

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Goran Domazet

Zagreb, 2011.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Gojko Marić

Student:

Goran Domazet

Zagreb, 2011.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Na prvome mjestu se zahvaljujem mentoru doc.dr.sc. Gojku Mariću na velikoj pomoći, uloženom trudu, bezbrojnim savjetima, diskusijama i poticajima tijekom izrade rada.

Zahvaljujem se prof.dr.sc. Krešimiru Grilecu na korisnim savjetima oko vršenja ispitivanja na uređaju T - 03 metodom "4 kuglice" .

Zahvaljujem se svim članovima Katedre za materijale i triblogiju što su mi omogućili korištenje laboratorija pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem se svojim kolegama i prijateljima a posebno svom velikom prijatelju dipl. ing. Ivanu Krameru na bezrezervnoj potpori tijekom svih ovih godina studiranja.

Zahvaljujem se svojim roditeljima koji su mi omogućili školovanje i uvijek mi pružali veliku podršku.

Na kraju se posebno zahvaljujem svojoj djeci Niki i Nikoli, te svojoj dragoj supruzi Branki na svakodnevnoj potpori, strpljenju i razumijevanju.

Hvala vam svima

Goran Domazet



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

GORAN DOMAZET

Mat. br.: 35961294

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**SMANJENJE UMORA POVRŠINE ZUPČANIK A IZBOROM
ODGOVARAJUĆEG ULJA**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**REDUCTION OF GEAR SURFACE FATIGUE BY CHOOSING
ADEQUATE OIL**

Opis zadatka:

Umor površine je odvajanje čestica s površine uslijed cikličkih promjena naprežanja. Pri njemu dolazi do ispadanja krupne čestice oblika ivera, što na površini ostavlja oštećenje oblika rupice. Zato se ovaj oblik trošenja uobičajeno naziva piting (rupičenje).

Piting je dominantan mehanizam trošenja kod kotrljanja, a da bi se on smanjio potreban je uz izbor materijala koji ima zadovoljavajuću dinamičku izdržljivost površine i izbor odgovarajućeg ulja. Jedna od metoda eksperimentalnog određivanja dinamičke izdržljivosti površine je metoda "4 kuglice" uz kotrljajući dodir donje standardne tri kuglice i gornje kuglice ili stošca koji zamjenjuje gornju kuglicu.

U ovom radu je potrebno:

- 1) Opisati mehanizam umora površine i proces kotrljajućeg trošenja.
- 2) Opisati metodu ispitivanja "4 kuglice" i uređaj za ispitivanje.
- 3) Ispitati nekoliko različitih zupčaničkih ulja ovom metodom.
- 4) Analizirati rezultate i dati zaključak.

Zadatak zadan:

6. listopada 2011.

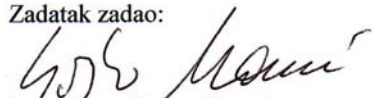
Rok predaje rada:

8. prosinca 2011.


Predviđeni datumi obrane:

14. – 16. prosinca 2011.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Gojko Marić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA:.....	VI
SAŽETAK.....	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Izbor materijala triboelemena:	1
1.2. Zaštita površina od trošenja	2
1.3. Uhodavanje	2
1.4. Podmazivanje.....	2
2. TRENJE KOTRLJANJA.....	6
3. TROŠENJE.....	11
3.1. Abrazija.....	12
3.2. Adhezija	13
3.3. Tribokorozija.....	14
3.4. Umor površine.....	15
3.4.1. Otpornost na umor površine.....	18
4. PROCESI TROŠENJA.....	19
4.1. Kotrljajuće trošenje	22
4.2. Rupičenje (piting)	26
4.3. Primjeri nepredviđenog kotrljajućeg trošenja materijala	31
4.4. Materijali za zupčanike	32
4.5. Materijali za kuglične ležajeve	34
5. PODMAZIVANJE	35
5.1. Ulja za zupčanike	36
5.1.1. Ulja za zupčaste prijenosnike automobila.....	37
5.1.2. Ulja za zupčaste prijenosnike u industriji	37
6. KOTRLJAJUĆE ISPITIVANJE METODOM “4 KUGLICE” (“FOUR BALL”IP 300)	38
6.1. Opis uređaja “4 kuglice” T - 03	38
6.2. Dijelovi uređaja T – 03	39
6.2.1. Tijelo uređaja	41
6.2.2. Dodir kuglica.....	41
6.3. Tehnički podatci o uređaju T - 03	42
6.3.1. Pogonska jedinica	43
7. PRIPREMA UZORAKA.....	44
7.1. Postavljanje tri donje kuglice u odgovarajući položaj	45
8. REZULTATI MJERENJA	50
9. USPOREDNA ANALIZA	56

10. ZAKLJUČAK.....	58
PRILOZI.....	59
LITERATURA.....	60

POPIS SLIKA

Slika 1.	Eskimska lučna naprava za paljenje vatre	3
Slika 2.	Podmazivač saonica pri transportu velike statue,. Egipat (Saccara),oko 2400 godina p.K.	3
Slika 3.	Slika trenja kotrljanja	6
Slika 4.	Trenje kotrljanja	7
Slika 5.	Pokus trenja kotrljanja	9
Slika 6.	Ovisnost sile trenja kotrljanja o broju prolaza	10
Slika 7.	Abrazijsko trošenje	12
Slika 8.	Abrazijsko trošenje između dva tijela	12
Slika 9.	Abrazijsko trošenje između tri tijela	13
Slika 10.	Adhezijsko trošenje	13
Slika 11.	Jedinični događaj tribokorozije	14
Slika 12.	Umor površine	15
Slika 13.	Raspodjela smičnih naprezanja za slučaj dodira ravnina / valjak i normalnog opterećenja.	16
Slika 14.	Izgled površine oštećene umorom	17
Slika 15.	Izgled kuglastih čestica trošenja nastalih umorom površine	17
Slika 16.	Opći oblik procesa trošenja	19
Slika 17.	Shema kotrljajućeg trošenja	23
Slika 18.	Procesi trošenja kotrljajućih elemenata	24
Slika 19.	Oštećenje umorom površine na zubima zupčanika	26
Slika 20.	Oštećenje zubi zupčanika zbog umora površine	26
Slika 21.	Slika prikazuje progresivno rupičenje na bokovima zuba zupčanika	28
Slika 22.	Mikro rupičenje na zubima zupčanika	28
Slika 23.	Slika prikazuje "flake pitting" oštećenje na zubu zupčanika	29
Slika 24.	Dijagram savojne dinamičke izdržljivost R_{ds} – vlačne čvrstoće R_m uobičajenih materijala zupčanika	33
Slika 25.	Dijagram $C-HV$ uobičajenih materijala zupčanika, HV-VICKERS-ova tvrdoća HV	33
Slika 26.	Rupice u kliznoj stazi unutrašnjeg prstena kotrljajućeg kugličnog ležaja	34
Slika 27.	T - 03 Uređaj za ispitivanje metodom "4 kuglice" ("FOUR BALL")	38
Slika 28.	Kinematička shema uređaja T - 03	39
Slika 29.	Prednji pogled uređaja T - 03	40
Slika 30.	Bočni pogled uređaja T - 03	40
Slika 31.	Prikaz sklopa dijelova u kojem rotiraju kuglice	41
Slika 32.	Specifikacijska pločica na uređaju	42
Slika 33.	Asinkroni motor na uređaju T – 03	43
Slika 34.	Tehnički crtež posude u kojoj se nalaze tri donje kuglice	44
Slika 35.	Kuglice za ispitivanje	44
Slika 36.	Prikaz ručke za zaključavanje poluge	45
Slika 37.	Posuda sa kuglicama	46
Slika 38.	Prikaz ključa 65 mm i matice	46
Slika 39.	Prikazuje ulja korištenog u radu za mjerenja	47
Slika 40.	Prikazuje kuglicu u gornjem položaju stroja	47
Slika 41.	prikazuje sklop u kojem se rotiraju kuglice postavljenim na postolje stroja.....	48
Slika 42.	prikaz ručke u gornjem položaju	48

Slika 43.	prikazuje magnetni senzor i klizni uložak na željezni okvir posude	49
Slika 44.	Slika prikazuje utege stroja	49
Slika 45.	Slika prikazuje rupičasto oštećenje površine kuglice pri mjerenju sa uljem A1 ...	50
Slika 46.	Slika prikazuje rupičasto oštećenje površine kuglice pri mjerenju sa uljem D1 ...	51
Slika 47.	Slika prikazuje rupičasto oštećenje površine kuglice pri mjerenju sa uljem B2 ...	51
Slika 48.	Grafički prikaz rezultata ispitivanja ulja A	52
Slika 49.	Grafički prikaz rezultata ispitivanja ulja B.....	53
Slika 50.	Grafički prikaz rezultata ispitivanja ulja C.....	54
Slika 51.	Grafički prikaz rezultata ispitivanja ulja D	55
Slika 52.	Grafički prikaz vremena trajanja ispitivanja za sve uzorke	56
Slika 53.	Grafički prikaz vibracija pri ispitivanju za sve uzorke ulja.....	57
Slika 54.	Grafički prikaz temperature pri ispitivanju za sve uzorke ulja	57

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Faktori trenja [1]
Tablica 2.	Razrada vrsta i mehanizama trošenja prema DIN 50320 i VDI 382
Tablica 3.	Uzroci neispravnosti određenih strojarskih elemenata [4]
Tablica 4.	Opće upute za izbor materijala [1]
Tablica 5.	Tehnički podatci o uređaju T - 03 [8]
Tablica 6.	Rezultati ispitivanja ulja A
Tablica 7.	Rezultati ispitivanja ulja B10
Tablica 8.	Rezultati ispitivanja ulja C
Tablica 9.	Rezultati ispitivanja ulja D

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA:

Oznaka	Jedinica	Opis
F	N	sila
G	N	težina
F_{tr}	N	sila trenja
F_R	N	rezultantna sila
p	Pa	tlak
r	mm	polumjer kotača
e	mm	pomak rezultantne sile
μ_{kotr}	-	faktor trenja kotrljanja
F_t	N	tangencijalna sila
F_N	N	normalna sila
k	-	konstanta materijala
D	mm	promjer
ω	m/s	kutna brzina
n_u	s	trajanje uhodavanja
n_p	s	projetkirana trajnost
N_i	s	trajanje inkubacije
R_{ds}	N/mm^2	svojna dinamička izdržljivost
R_m	N/mm^2	vlačna čvrstoća
HV	-	tvrdća po Vickersu
HRC	-	tvrdća po Rockwellu
m	kg	masa
P	W	snaga
U	V	napon
f	Hz	frekvencija

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu opisuje se smanjenje umora površine, te kotrljajuće trošenje kod kojeg je najveća mogućnost da se kao mehanizam trošenja javi umor površine.

Eksperimentalna metoda koja je korištena za određivanje dinamičke izdržljivosti površine je metoda "4 kuglice".

U uvodnom dijelu rada su opisani mehanizmi trošenja s posebnim naglaskom na kotrljajuće trošenje i rupičenje (pitting). Nakon toga je detaljno opisan uređaj za ispitivanje dinamičke izdržljivosti metodom 4 kuglice T-03 koji se nalazi u Laboratoriju za tribologiju, Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Tijekom ispitivanja pomoću ovog uređaja mjeri se :

- razina vibracija tribosustava
- temperatura lubrikanta
- vrijeme trajanja ispitivanja

U eksperimentalnom dijelu rada korištene su 4 vrste različitih ulja za zupčanike A, B, C i D. U ovom se slučaju radi o proizvodima koji su komercijalno dostupni i učestalo se koriste za podmazivanje zupčanika u različitim vrstama prijenosa.

Za svaku vrstu ulja napravljeno je nekoliko mjerenja. Analiza dobivenih eksperimentalnih rezultata prikazana je u tabličnom i grafičkom obliku. Na temelju interpretacije rezultata analize dan je i zaključak rada.

1. UVOD

Naziv **tribologija** dolazi od grčkog τριβος što znači trenje, trošenje i slično. [1]

Tribologija je znanost i tehnika o površinama u dodiru i relativnom gibanju i o pratećim aktivnostima. Ovo je prijevod službene definicije, prvi put objavljene 1966. godine u izvještaju Radne grupe Ministarstva prosvjete i znanosti Ujedinjenog Kraljevstva, koju je vodio P. Jost. [1]

Jednostavnije i razumljivije bi se moglo reći da je tribologija znanstveno-stručna disciplina koja se sveobuhvatno bavi problemima trenja i trošenja. [1]

Glavna područja primjene tribologije su: [1]

- podmazivanje (ulja, masti, aditivi)
- obradba materijala (sredstva za hlađenje i podmazivanje, alatni materijali, lakoobradljivi materijali)
- mehaničke konstrukcije (zupčanici, ležaji, klizni elementi), materijali (novi materijali, keramika, polimeri, metali, inženjerstvo površina)

Tribološke mjere se mogu podijeliti na 4 dijela i to : [1]

- Izborom materijala triboelemenata
- Zaštitom površina od trošenja
- Uhodavanjem
- Podmazivanjem

1.1. Izbor materijala triboelemena:

Za pravilan izbor potrebno je odrediti koji je prevladavajući mehanizam trošenja (abrazija, adhezija, umor površine ili tribokorozija). [1]

Izbor materijala triboelemenata od odlučujuće je važnosti za ispravno funkcioniranje tribosustava.

Sam izbor materijala provodi se na temelju laboratorijskih i eksploatacijskih ispitivanja triboloških svojstava.

1.2. **Zaštita površina od trošenja**

Surface engineering (inženjerstvo površina) je posebna znanstveno stručna disciplina koja se bavi ovim postupcima .[1]

Zamisao je da se osnovni materijal (supstrat), prethodno odgovarajuće pripremljen, (i možda već očvrstnut na površini odgovarajućim postupkom), naknadno obrađuje jednom od površinskih tehnologija, tako da nastaje kombinacija svojstava površinskog sloja i osnovnog materijala kakva se ne može postići upotrebom bilo kojeg jednorodnog materijala.

Na ovaj način nastaju površinski modificirani kompozitni materijali.

Pod zaštitom površina od trošenja podrazumjeva se primjena nekog od postupaka oplemenjivanja površina.

1.3. **Uhodavanje**

Uhodavanje kao početna faza rada u kojoj se dodirne površine međusobno prilagođavaju najčešće se potpomažu prilagođenim uvjetima rada te oplemenjivanjem površina.[1]

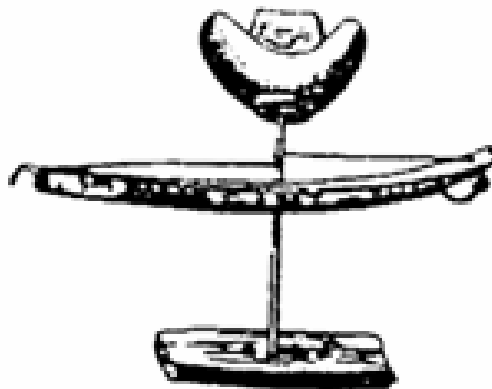
1.4. **Podmazivanje**

Podmazivanje se definira kao postupak kojim se smanjuje trenje i trošenje, ili drugi oblici razaranja materijala, primjenom različitih vrsta maziva. Svrha podmazivanja je da se dodirne površine razdvoje slojem maziva, koje se može smicati s manjim otporom bez izazivanja oštećenja površine.

Još davno prije ljudi su ne znajući ništa o tribologiji neke teške predmete pomicali tako da su ih smjestili na saonice ili drvene poluge a ispred njih su prolijevali neku tekućinu kako bi olakšali pomicanje predmeta. I dan danas ostaje nepoznanica kako su stari Egipćani pomicali tako teške kamene blokove pri gradnji piramida. Dio tribologije koji se bavi njenim povjesnim aspektom naziva se arheotribologija. Njen zadatak je istraživanje triboloških svojstava arheoloških artefakata, uključujući prevlake, klizne površine itd., kao i istraživanje drevnih tehnologija korištenih za njihovo dobivanje.

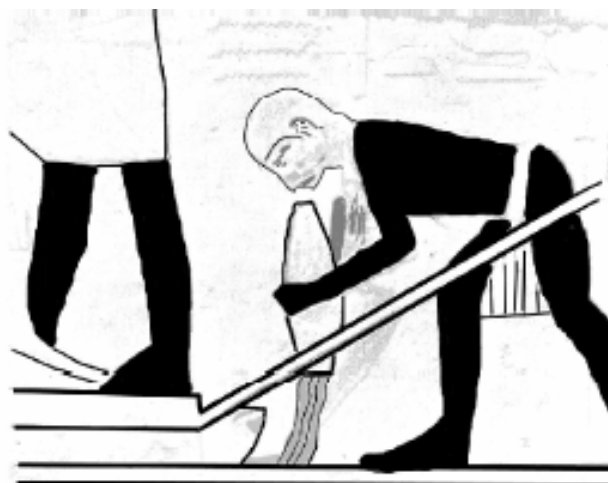
Neka najvažnija otkrića čovječanstva blisko su povezana s tribologijom, na primjer otkriće vatre (prije otprilike 800 000 godina). [1]

Postoje vrlo stari dokazi koji svjedoče o korištenju lučnih naprava kojima je toplina trenja korištena za paljenje vatre, slika 1.



Slika 1. Eskimska lučna naprava za paljenje vatre [1]

Na slici 2 prikazan je podmazivač saonica kako podmazuje saonice pri transportu teških predmeta.



Slika 2. Podmazivač saonica pri transportu velike statue, Egipat (Saccara), oko 2400 godina p.K. [1]

U industrijskoj i drugoj primjeni sve više raste potreba za smanjenjem trenja i trošenja iz nekoliko razloga: [1]

- produžetak vijeka trajanja radnih sustava
- povećanje efikasnosti radnih sustava
- smanjenje troškova održavanja
- smanjenje troškova zastoja
- poboljšanje pouzdanosti
- povećanje sigurnosti
- očuvanje oskudnih izvora materijala
- očuvanje energije
- smanjenje otpada

Za ostvarenje relativnog gibanja između dodirnih ploha treba savladati silu trenja (riječ trenje dolazi od glagola trti, trljati; engleski izraz friction ima porijeklo u latinskoj imenici fricare – trljanje). Prema definiciji trenje je sila ili otpor koja se suprotstavlja relativnom kretanju krutih tijela u dodiru. Djeluje paralelno s dodirnim površinama, a smjer joj je suprotan smjeru relativnog kretanja. Još jednostavnija definicija kaže da je trenje otpor kretanja jednog tijela prema drugom. U većini slučajeva, u mnogobrojnim i različitim pokretnim elementima strojeva, uređaja i postrojenja, trenje je nepoželjna i štetna pojava. Kao posljedica trenja na površinama u kontaktu dolazi do trošenja i zagrijavanja materijala površina. Procjena je da se čak 10% potrošnje nafte koristi se za savladavanje štetnog trenja, pa je stoga bitno razumjeti osnovnu podjelu i vrste trenja [1].

Vrste trenja prema agregatnom stanju tijela u kontaktu:

- trenje među čvrstim površinama (tzv. vanjsko trenje)
- trenje među dijelovima fluida, odnosno između čvrstog tijela i fluida (tekućinsko trenje ili viskoznost)

Vanjsko trenje se prema podmazivanju može podijeliti na:

- suho trenje
- trenje uz podmazivanje

Prilikom pokretanja tijela razlikujemo:

- trenje mirovanja (statičko trenje, trenje pokretanja) – najveća sila trenja koja prisiljava tijelo da još miruje
- trenje kretanja (kinetičko, dinamičko trenje) – sila koju je potrebno savladati da bi se održalo stanje relativnog kretanja

Na trenje utječu:

- kemijski sastav materijala
- stanje obrade površine oba tijela
- sastav okoline
- opterećenje
- brzina kretanja
- način kretanja (pravocrtno, krivudavo, naprijed-natrag...)
- vrste kontakta (površinski, koncentrirani)
- temperature
- prethodno klizanje po toj površini

Kako se u ovom radu razmatra kotrljajuće trošenje površina, važno je objasniti trenje kotrljanja.

2. TRENJE KOTRLJANJA

Trenje kotrljanja je otpor što se pojavljuje pri kotrljanju kružnih ploča, kotača ili valjaka.

Općenito vrijedi da je trenje kotrljanja po površini mnogo manje nego trenje klizanja.

To je zato što uglavnom izostaju komponente sile trenja koje potječu od brazdanja, ΣF_3 i raskidanja adhezijskih veza, ΣF_4 . [1]

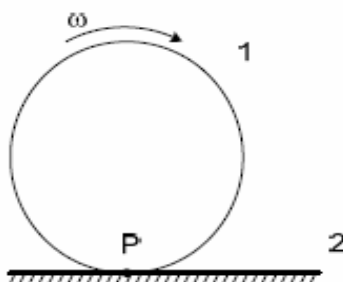
Sila trenja klizanja sastoji se od zbroja četiriju komponenata koje su i same zbroj pojedinačnih komponenata koje djeluju na svakom dodiru mikroizbočina, dok se sile trenja kotrljanja sastoje od zbroja dvaju komponenata .

$$F_t = \Sigma F_1 + \Sigma F_2 + \Sigma F_3 + \Sigma F_4 \quad (\text{sila trenja klizanja})$$

$$F_t = \Sigma F_1 + \Sigma F_2 \quad (\text{sila trenja kotrljanja})$$

- ΣF_1 - otpor na elastičnu deformaciju
- ΣF_2 - otpor na plastičnu deformaciju
- ΣF_3 - otpor na brazdanje
- ΣF_4 - otpor na kidanje adhezijskih veza

Trenje kotrljanja javlja se u slučajevima kada je kontakt ostvaren u jednoj točki odnosno liniji (P).



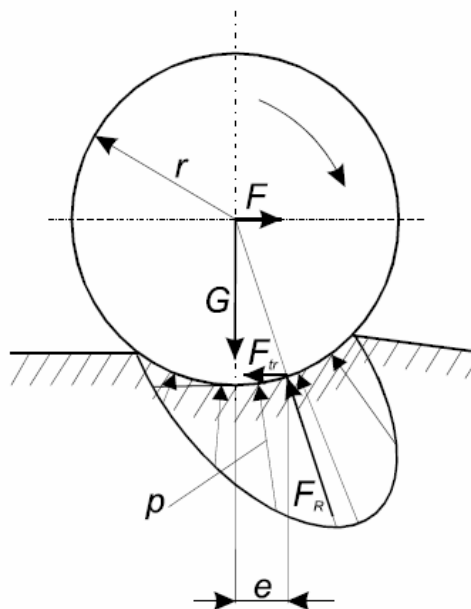
Slika 3. Slika trenja kotrljanja [2]

Kod trenja kotrljanja nema izraženog statičkog trenja što se može objasniti "polaganim ulaženjem i izlaženjem u i iz kontakta".

Ovo je ujedno i osnovna razlika između trenja klizanja i trenja kotrljanja što značajno utječe na upravljanje slijednim sustavima. [2]

Približna slika opterećenja krutog kotača što se kotrlja po deformabilnoj podlozi prikazana je na slici 4.

F - sila kotrljanja
 G - težina kotača
 F_{tr} - sila trenja
 F_R - rezultatna sila
 p - tlak
 r - polumjer kotača
 e - pomak rezultatne sile u odnosu na os kotača



Slika 4. Trenje kotrljanja [1]

Pomak rezultatne sile sile (F_R) u odnosu na os kotača (e) ovisi o brojnim čimbenicima koje je vrlo teško kvantificirati.

Općenito potpuna teorija o otporu kotrljanja ne postoji u decidiranom obliku.

Izraz koji povezuje silu trenja i normalnu silu (težinu kotača): [1]

$$F_{tr} = \frac{e}{r} G = \mu_{kotr} G$$

Faktor kotrljanja $\mu_{kotr} = \frac{e}{r}$ budući da je omjer između sile otpora i težine, pa je utom smislu sličan faktoru statičkog i kinetičkog trenja.

U tablici (1) su prikazane dodirne površine kao i njihovi faktori trenja (mirovanja, klizanja, kotrljanja).

Iz priložene tablice vidljivo je da je faktor trenja kotrljanja dodirnih površina najmanji u odnosu na trenje mirovanja i klizanja. [1]

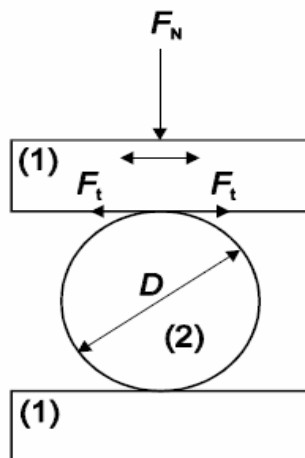
Tablica 1. Faktori trenja [1]

Dodirne površine	Faktor trenja	Faktor trenja klizanja	Faktor trenja kotrljanja
drvo na drvu	0,5	0,3	0,05
čelik na čeliku	0,7	0,5	0,03
guma na suhom asfaltu	0,8	0,6	0,01
guma na mokrom asfaltu	0,3	0,2	0,05
guma na ledu	0,02	0,01	
čelik na ledu	0,03	0,01	

Činjenice koje vrijede za faktor trenja kotrljanja : [1]

- Ovisnost trenja kotrljanja o brzini je mala (opada s porastom brzine).
- Trenje mirovanja je veće od trenja kretanja.
- Sila trenja kotrljanja je proporcionalna sili opterećenja na određenu potenciju koja varira od 1,2 (kod manjih opterećenja) do 2,4 (kod većih opterećenja).
- Sila trenja je obrnuto proporcionalna promjeru kotrljajućeg tijela.
- Sila trenja kotrljanja je manja za glatke, a veća za grube i neravne površine, zbog toga trenje opada uhodavanjem.

Jedan pokus trenja kotrljanja prikazan je na slici 5.



Slika 5. Pokus trenja kotrljanja [1]

Na slici (5) prikazana je kaljena čelična kuglica koja se kotrlja lijevo-desno između dvije ploče s određenim opterećenjem F_N .

Za prvi prolaz vrijedi:

$$F_t = \frac{k F_N^{\frac{3}{2}}}{D}$$

gdje je:

F_t -tangencijalna sila

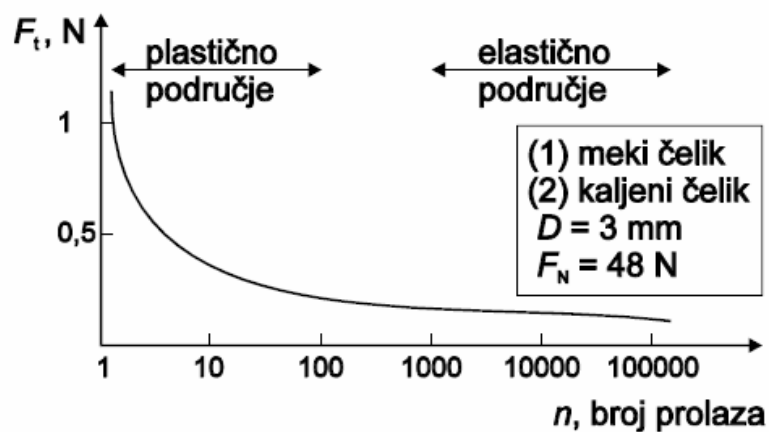
F_N –normalna sila

k - konstanta materijala

D - promjer kuglice

Što je veći broj prolaza smanjuje se sila F_t jer se smanjuje intenzivnost plastične deformacije. Nakon velikog broja prolaza plastična deformacija sasvim izostaje i sila trenja sastoji se samo od otpora elastičnim deformacijama i posebno je niska.

Na slici broj (6) prikazana je sila trenja kotrljanja koja ovisi o broju prolaza.



Slika 6. Ovisnost sile trenja kotrljanja o broju prolaza [1]

Koeficijent trenja kotrljanja nakon 100 000 prolaza iznosi oko:

$$\mu = \frac{F_{tr}}{F_N} = \frac{0,1}{48} = 0,002$$

3. TROŠENJE

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama. [1]

Trošenjem se još smatra erozija materijala čvršte površine sa drugim čvrstim predmetom. Proučavanje procesa trošenja je dio discipline koja se naziva tribologija.

To je u osnovi fizikalni, a ne kemijski proces.

Mehanizmi trošenja opisuju se pomoću jediničnog događaja, tj. slijeda događaja koji prethode otkidanju jedne čestice trošenja s radne površine tijela.

Svaki realni proces trošenja sastoji se od jednog, dva ili više osnovnih mehanizama trošenja koji djeluju u vremenskom slijedu ili istovremeno.

Postoje razni oblici trošenja kao posljedica raznovrsnosti uvjeta kontakata (stanje površine, način i brzina relativnog gibanja, temperatura...) tako da otpornost trošenju ne predstavlja jedinstveno svojstvo već naziv za grupu svojstava.

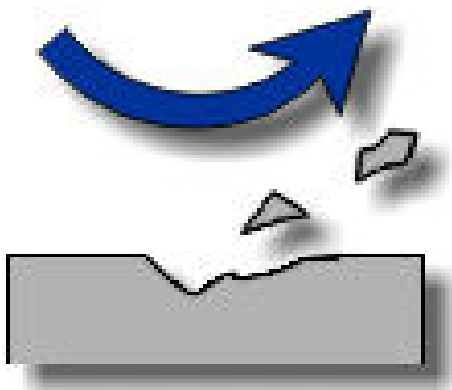
Tribosustavi su sustavi u kojima se pojavljuju procesi trošenja, a to su svi sustavi kod kojih postoji relativno gibanje između pojedinih dijelova.

Stručnjaci koji se bave ispitivanjem trošenja materijala u većini su suglasni da postoje samo četiri osnovna mehanizma trošenja i to: [1]

- abrazija
- adhezija
- tribokorozija
- umor površine

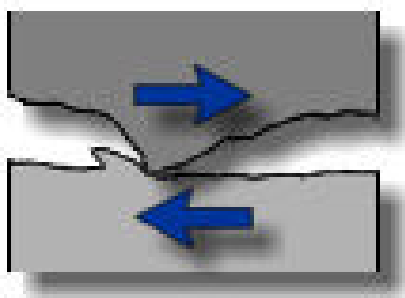
3.1. Abrazija

To je najučestalije trošenje u industriji. Nastaje kao posljedica prodiranja vrhova tvrdog materijala u površinske slojeve mekšeg uz brazdanje pri uzajamnom gibanju tijela. [3]



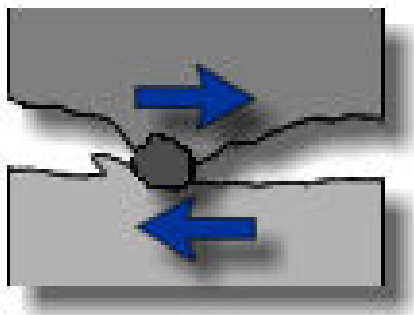
Slika 7. Abrazijsko trošenje [3]

Abrazivno sredstvo može biti proizvod tipa: ugljen, cement, kamen, staklo, keramika i sl. Trošenje se stoga javlja prilikom kopanja rudače, drobljenja, izvlačenja i otpremanja. Strojni dijelovi su tada izloženi visokim napreznjima i tzv. abraziji između dva tijela (Two-Body Abrasion). Borba protiv ove vrste trošenja zahtijeva vrlo tvrde, guste i otporne materijale za površinsku zaštitu. [3]



Slika 8. Abrazijsko trošenje između dva tijela [3]

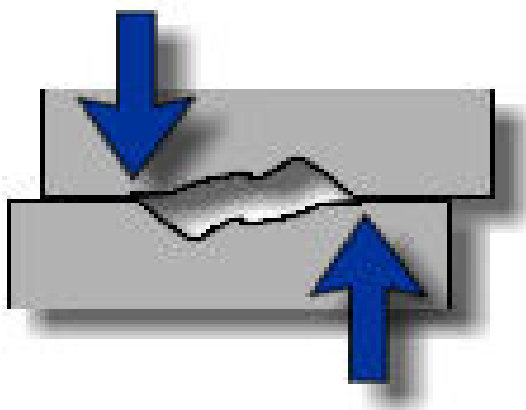
Abrazija između tri tijela (Three- Body Abrasion) javlja se kod uređaja kao što su pumpe ili ventili kada se abrazivno sredstvo zaglavi između površina u trenju (pr. ležajevi). I ovdje se zbog visokih naprezanja moraju koristiti čvrsti i otporni materijali.[3]



Slika 9. Abrazijsko trošenje između tri tijela [3]

3.2. Adhezija

Adhezijsko trošenje nastaje kao posljedica djelovanja međumolekularnih sila u točkama dodira tijela, a manifestira se kroz „preraspodjelu“ materijala s jedne na suprotnu površinu. [3]

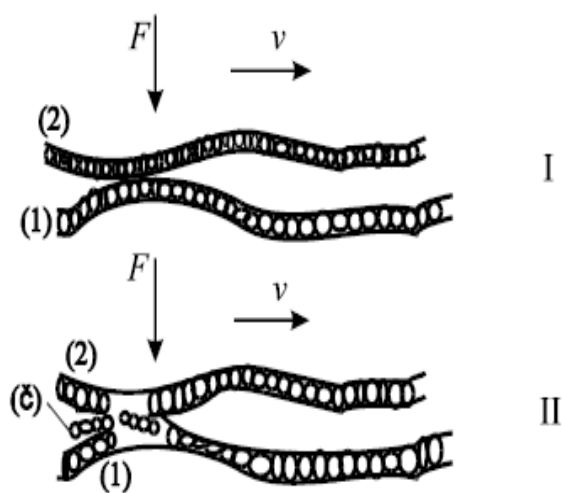


Slika 10. Adhezijsko trošenje [3]

To često dovodi do puknuća i hladnog zavarivanja radnih dijelova. Adhezijsko trošenje se reducira korištenjem različitih materijala i tvrdih površina otpornih na ovu vrstu trošenja.[3]

3.3. Tribokorozija

Tribokorozija ili tribokemijsko trošenje je mehanizam trošenja pri kojem prevladavaju kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala sa okolišem. [1]



Slika 11. Jedinični događaj tribokorozije [1]

- I - stvaranje (ili obnavljanje) sloja produkata korozije
- II - mjestimično razaranje sloja produkata korozije

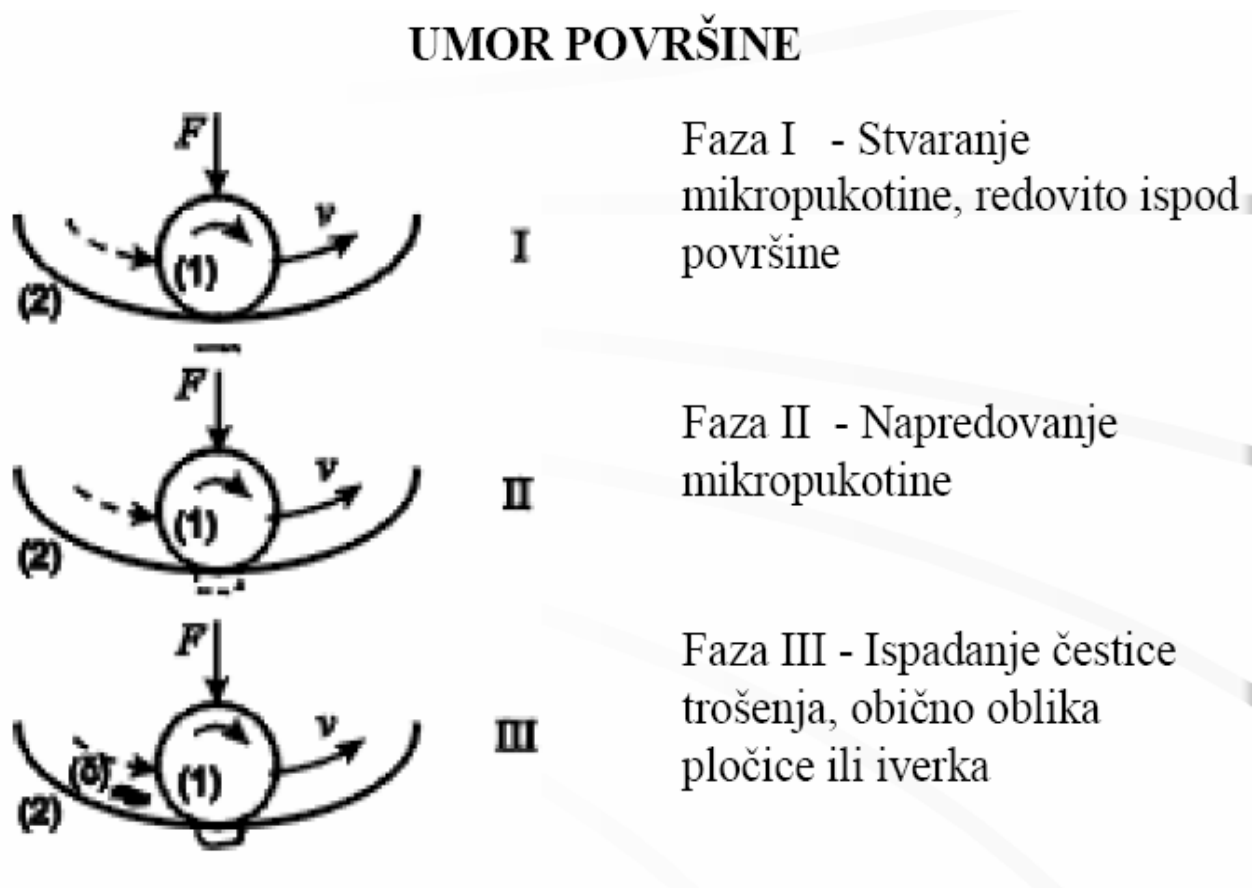
3.4. Umor površine

Umor površine je odvajanje čestica s površine uslijed cikličkih promjena naprežanja, kod kojih dolazi odvajanja čestica u obliku ivera s površine materijala. [1]

Umor površine ima znatni utjecaj u mnogim inženjerskim primjenama kod kojih postoji koncentrirani dodir i jedan je od prevladavajućih oblika trošenja elemenata prijenosnika kao što su zupčanici i kotrljajući ležajevi.

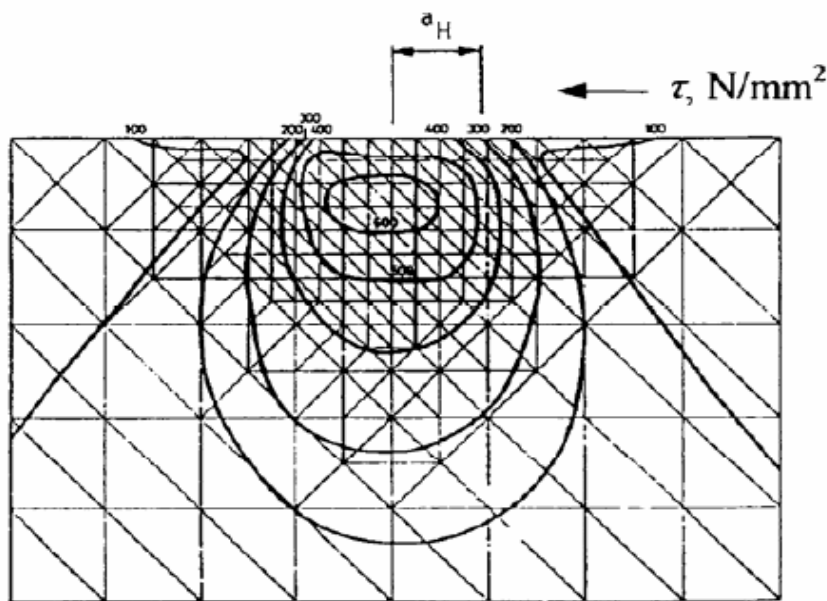
Da bi se izbjeglo takvo trošenje nužno je koristiti materijal koji ima zadovoljavajuću dinamičku izdržljivost površine.

Jedinični događaj umora površine prikazan je na slici (12). [1]



Slika 12. Umor površine [1]

U prvoj fazi nastaje podpovršinska pukotina jer je najveće smično naprezanje kod koncentriranog dodira (tzv. Hertz-ovo naprezanje) uvijek ispod same površine, slika 13. Ovo je tzv. faza inkubacije jer praktički nema nikakvog odvajanja čestica. [1]



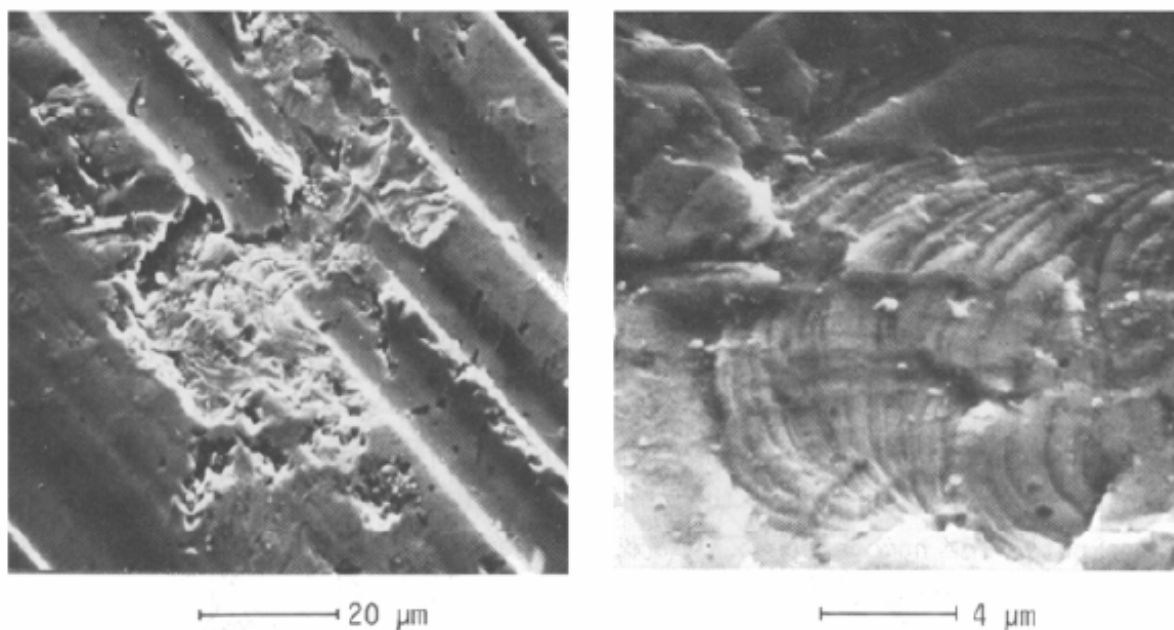
Slika 13. Raspodjela smičnih naprezanja za slučaj dodira ravnina / valjak i normalnog opterećenja. [1]

U drugoj fazi podpovršinska pukotina izbija na površinu. Od toga trenutka iz pukotine redovito izlaze sitne kuglaste čestice.

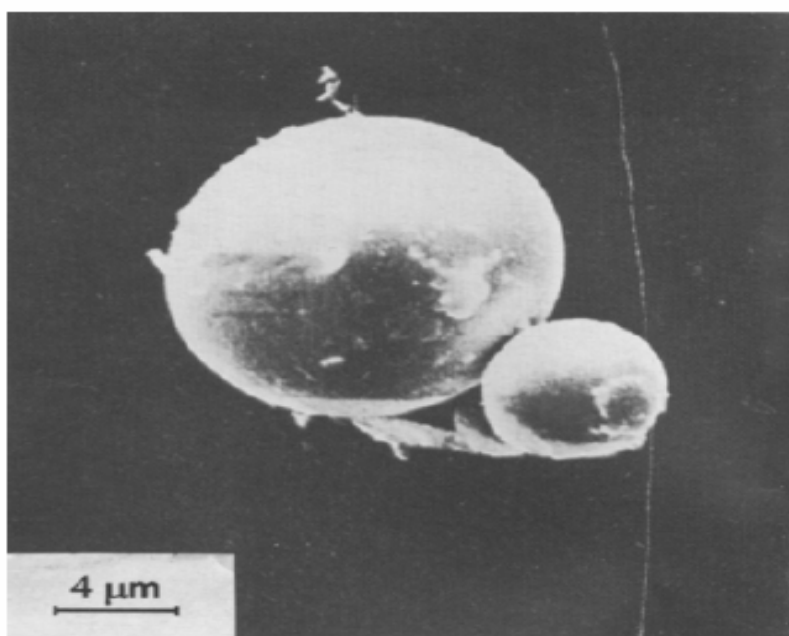
U trećoj fazi jediničnog događaja umora površine dolazi do ispadanja krupne čestice oblika ivera, što na površini ostavlja oštećenje oblika rupice.

Zato se ovaj oblik trošenja uobičajeno naziva pitting (rupičenje).

Izgled trošene površine i čestica nastalih umorom površine prikazuju slike 14 i 15.



Slika 14. Izgled površine oštećene umorom [1]



Slika 15. Izgled kuglastih čestica trošenja nastalih umorom površine [1]

3.4.1. Otpornost na umor površine

Otpornost na umor površine naziva se još i dinamička izdržljivost površine.

Dinamička izdržljivost površine ovisi o otporu gibanja dislokacija a na njega utječe mnogo čimbenika kao što su površinski i podpovršinski čimbenici. [1]

Površinski čimbenici:

I. Tangencijalne sile

- bez znatnog klizanja
- kotrljanje uz klizanje

II. Elastohidrodinamika

III. Površinske pogreške

- uključine i čestice druge faze
- ogrebotine i udubljenja

IV. Diskontinuiteti u geometriji dodira

- odstupanje od linijske geometrije dodira
- čestice u području dodira

V. Raspodjela opterećenja u ležaju

- elastične deformacije
- međusobna neprilagođenost dijelova ležaja
- unutrašnja zračnost, regulacija ležaja

VI. Površinska obilježja

- topografija i tekstura površine
- zaostala naprezanja
- razina površinske energije
- mikrostruktura
- onečišćenja

Podpovršinski čimbenici:

VII. Podpovršinski koncentratori naprezanja

- granice zrna, malokutne granice, granice dvojnika i druge grupacije dislokacija
- sulfidi, karbidi i ostali konstituenti druge faze
- oksidi i druge tvrde, krhke uključine

4. PROCESI TROŠENJA

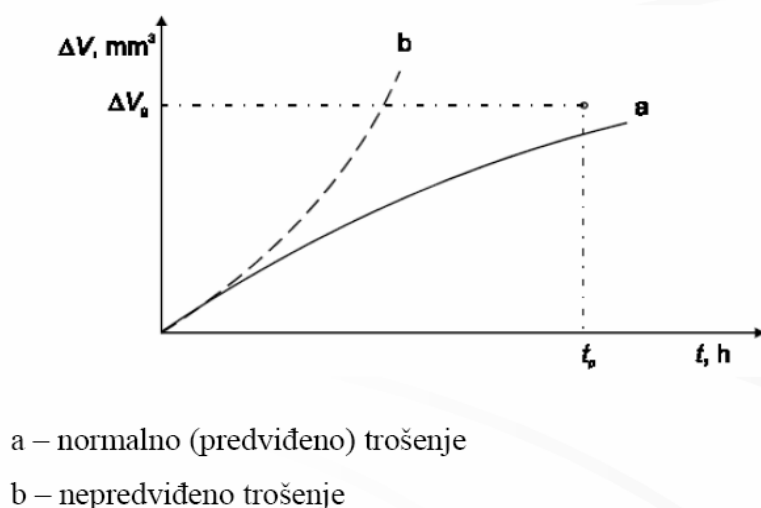
Kad god se površine kreću jedna po drugoj, dolazi do pojave trošenja - oštećenja na jednoj ili obje površine koje najčešće podrazumijeva i progresivan gubitak materijala.

U većini slučajeva, trošenje je štetno; uzrokuje povećanu zračnost između pomičnih komponenti, neželjenu slobodu kretanja, gubitak preciznosti, često vibracije, povećano mehaničko opterećenje i još brže trošenje, te ponekad i umor materijala. [3]

Gubitak relativno male količine materijala može biti dovoljan uzrok prestanka rada velikih i kompleksnih strojeva. Ipak, ponekad su (kao kod trenja) velika trošenja poželjna - npr. brušenje, mljevenje i poliranje koriste pojavu trenja za brzo odstranjivanje materijala u kontroliranim uvjetima, a niska razina trenja ponekad je i poželjna kod nekih procesa uhodavanja mehanizma. [3]

Primjenom odgovarajućih mjera cilj tribologije je postići da određeni tribosustav funkcionira pretežno u režimu tzv. normalnog trošenja.

Svaki proces trošenja sastoji se najčešće od dva mehanizma trošenja ili više njih, koji djeluju istodobno ili u vremenskom slijedu, ovisno o vrsti tribosustava, relativnom gibanju i radnim uvjetima .




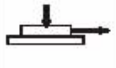
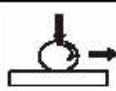
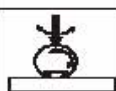
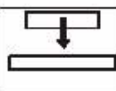
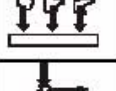
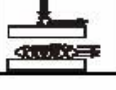


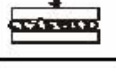
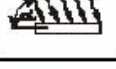
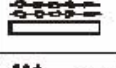
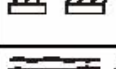
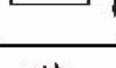
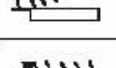
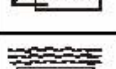
Slika 16. Opći oblik procesa trošenja [1]

Prema vrsti elemenata tribosustava, vrsti dodira, načinu opterećenja i obliku relativnog gibanja razlikuju se sljedeći slučajevi trošenja.[1]

- klizno trošenje
- kotrljajuće trošenje
- udarno
- freting
- abrazija
- erozija česticama
- erozija kapljevinom
- kavitacija

Osim ove podjele postoje i složenije koje navode brojnije različite slučajeve trošenja, kao što je podjela prema DIN 50320 i VDI 382 (tablica 2).[1]

Tablica 2. Razrada vrsta i mehanizama trošenja prema DIN 50320 i VDI 382

Struktura sustava	Tribološko naprezanje		Primjeri iz prakse	Vrsta trošenja	Mehanizam trošenja				
					● uglavnom prevladava ○ manje značajno				
					Adhezija	Abrazija	Umor površine	Tribokorozija	
Kruto tijelo - Medumedij (potpuno razdvajanje filma) - Kruto tijelo	Klizanje, Kotrljanje, Valjanje, Udaranje		Hidrodinamički podmazivani ležaji	-			●	○	
Kruto tijelo - Kruto tijelo (kod suhog, graničnog i mješovitog trenja)	Klizanje		Vodilice, klizni ležaji, čahure, osovine (faza uhođavanja), kuglasti ventili	Klizno	●	○	○	●	
	Kotrljanje, Valjanje		Valjkasti ležaji, igličasti ležaji, valjkasti ležaji, zupčanici, klizne površine bregaste osovine	Kotrljajuće, Valjno	○	○	●	○	
	Vibriranje		Udarne opruge, sjedišta opruga, teleskopske opruge, uzbudne opruge	Trošenje vibriranjem (izjedanje - fretting)	●	●	●	●	
	Udaranje		Igle ventila, ventili, udarno opterećeni graničnici	Udarano	○	○	●	○	
Kruto tijelo - Čestice			Udarne ploče na transportnim uređajima	Abrazijsko-udarno	ABRAZIJA		●	●	○
	Klizanje		Lopate bagera, svrdla za kamen, lopatice, gusjeničasti pogoni	Abrazijsko-klizno			●		○
Kruto tijelo - Kruto tijelo i čestice	Klizanje		Zaprljani ležaji i vodilice zbog neželjenih procesa	Abrazijsko-tri tijela	ABRAZIJA	○	●	●	○
	Valjanje		Strojevi za usitnjavanje i mlinovi, puževi ekstrudera			○	●	●	○
	Udaranje		Strojevi za usitnjavanje i mlinovi			○	○	●	○
Kruto tijelo - Tekućina s česticama	Strujanje		Lopatice, pumpe, cjevovodi	Hidroabrazijsko	EROZIJA		●	●	○
Kruto tijelo - Plin s česticama	Strujanje		Pneumatski transportni uređaji	Klizno trošenje mlazom čestica		○	●	●	○
	Strujanje, Udaranje		Uređaji za transport usitnjenog ugljena, cementa i žitarica	Trošenje udarom mlaza		○	●	●	○
Kruto tijelo - Tekućina	Strujanje, Vibriranje		Pumpe, ventilatori, brodski vijci	Kavitacijska erozija				●	○
	Udaranje		Lopatice parnih turbina	Erozija udarom kapljica				●	○
	Strujanje		Pumpe, ventili, cjevovodi	Erozija tekućinom				○	●
Kruto tijelo - Plin	Strujanje		Ploče za toplinsku zaštitu u plinskim turbinama	Erozija plinom				●	

4.1. Kotrljajuće trošenje

Svi strojevi, sklopovi i mehanizmi sastoje se, po pravilu, od svega nekoliko osnovnih pokretnih strojarskih elemenata: ležajeva (kliznih ili kotrljajućih), zupčanika, vodicica, lančanih prijenosnika i čeličnih užadi.

U svim tim elementima osnovna pojava je relativno kretanje različitih površina u direktnom ili indirektnom kontaktu.

Takvo kretanje može biti:

- klizanje jedne površine po drugoj,
- kotrljanje jednog elementa (kotač, kugla, valjak) po ravnoj površini
- kombinirano kretanje

Dva osnovna procesa koji se javljaju pri relativnom kretanju strojarskih elemenata su trenje na dodirnim površinama i trošenje materijala sa površina koje su u međusobnom kontaktu.

Određeno trošenje materijala površina u kontaktu i međusobno relativnom kretanju u određenoj sredini moramo smatrati normalnom pojavom.

Trošenja površina strojarskih elemenata nisu samo posljedica njihovog potpunog ili djelomičnog kontakta već i kontaktnih površina sa sredinom koja ih okružuje.

Relativno gibanje se može opisati kao kotrljanje.

Postoji sljedeći stupanj opasnosti od pojedinih mehanizma trošenja a to su:[1]

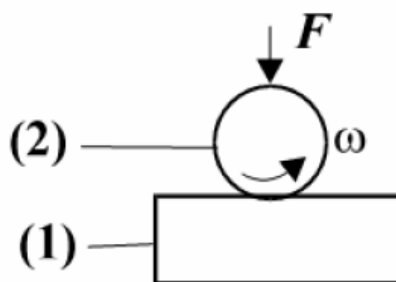
- Umor površine – jako visoki
- Abrazija – niski
- Adhezija – niski
- Tribokorozija – najniži

Pokazatelj otpornosti na trošenje površina je dinamička izdržljivost površine.

Karakteristični primjeri kotrljanja:

- kotrljajući ležaji
- zupčanici
- kotač / tračnica

Kotrljajuće trošenje javlja se kod uzastopnog kotrljajućeg dodira nekonformnih površina.



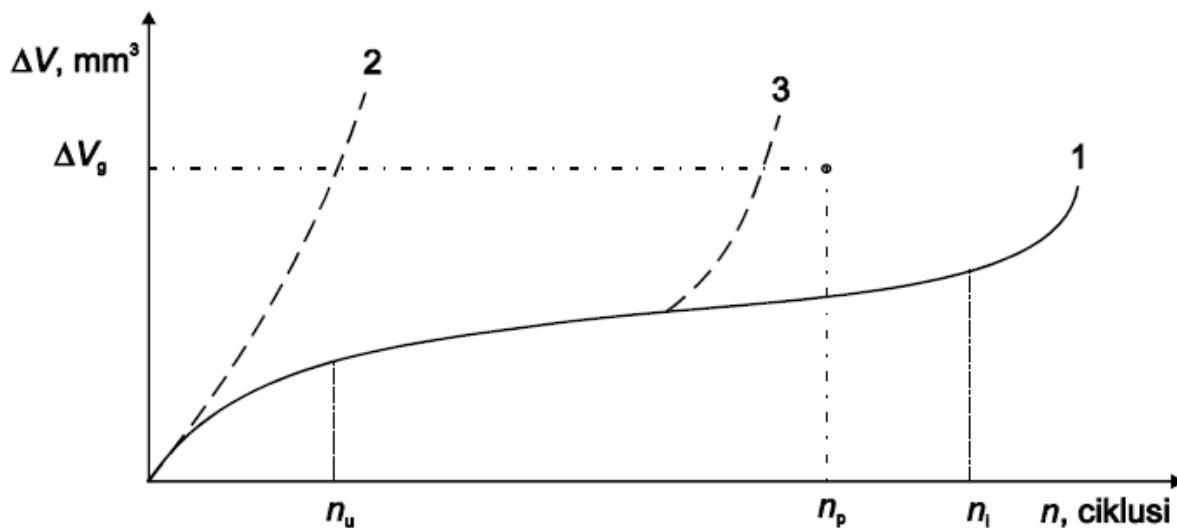
Shema procesa kotrljajućeg trošenja prikazana je na sljedećoj slici:

Slika 17. Shema kotrljajućeg trošenja [1]

Na slici 16 prikazano je sljedeće:

- (1) funkcionalni dio
- (2) funkcionalni dio
- F – sila
- ω - kutna brzina

Na slijedećoj slici prikazani su procesi trošenja kotrljajućih elemenata tijekom rada.



Slika 18. Proces trošenja kotrljajućih elemenata [1]

n_u - trajanje uhodavanja

n_p - projektirana trajnost

n_i - trajanje inkubacije umora površine

Krivulje prikazane na slici (17) prikazuju slijedeće:

Krivulja (1) prikazuje zadovoljavajući proces trošenja,

Krivulja (2) prikazuje neuspješno uhodavanje

Krivulja (3) prikazuje prerani umor površine

Iz dijagrama je vidljivo da je cilj težiti zadovoljavajućem procesu trošenja, dakle obliku kao što je krivulja 1, dok krivulje 2 i 3 predstavljaju neuspješno uhodavanje, odnosno prerani umor površine što je poželjno izbjeći kod kotrljajućeg trošenja.

Da bi se takvo što izbjeglo potrebno je poduzeti određene tribološke mjere.

- odgovarajuće podmazivanje
- zaštita površine od trošenja
- izbor odgovarajućeg materijala, zadovoljavajuće dinamičke izdržljivosti površine
- omogućavanje uhodavanja

Danas u znatnom broju slučajeva u praksi nailazimo i na pojačana i abnormalno visoka trošenja i oštećenja površina koja, u relativno kratkom vremenskom periodu, dovode do otkazivanja i loma strojarskog elementa, a time i do otkazivanja rada stroja pa i cijelog pogona.

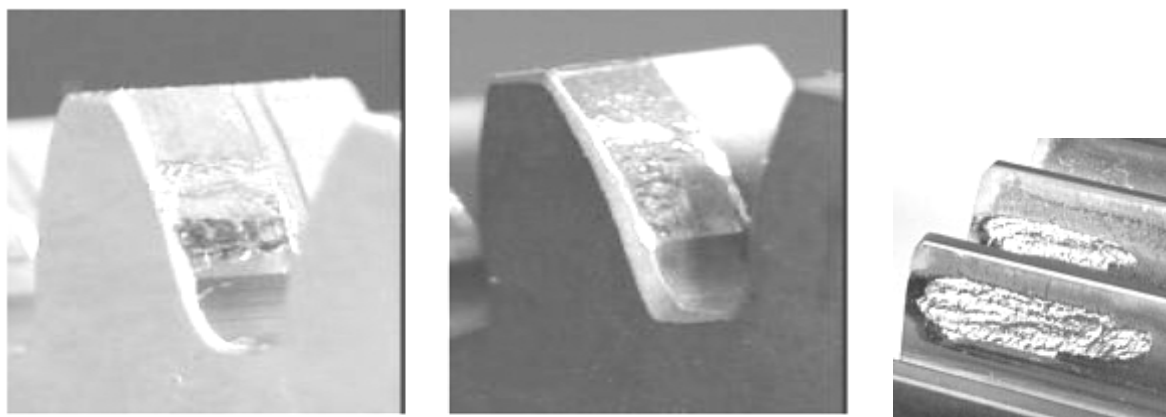
Tablica 3. Uzroci neispravnosti određenih strojarskih elemenata [4]

Uzroci neispravnosti	Zupčanci	Klizni ležajevi	Kotrljajući ležajevi
Nepravilan proračun i konstrukcija	6,9%	9,1%	13,8%
Greške u materijalu	0,8%	3,6%	1,9%
Greške proizvodnje i montaže	17,6%	10,7%	14,4%
Nepravilna eksploatacija, održavanje i kontrola	36,7%	39,1%	37,4%
Trošenje materijala tijekom dugotrajnog rada	38,0%	30,5%	28,5%
Ostalo	-	7,0%	4,0%

4.2. Rupičenje (piting)

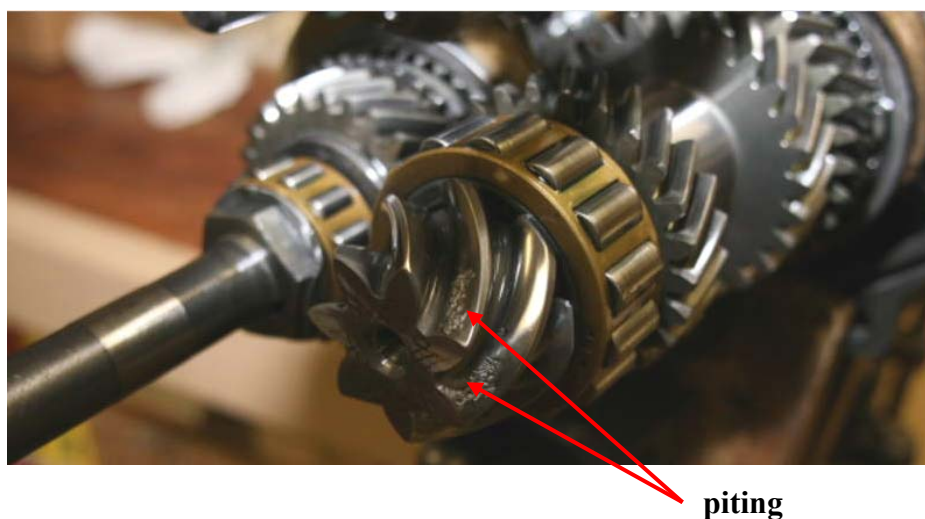
Rupičenje (piting) je pojava koja ima veliku ulogu u mnogim inženjerskim primjenama koje uključuju kotrljajući dodir.

Piting može nastati neposredno ispod površine na mjestu kotrljajućeg dodira dva tijela, gdje je prisutno najveće naprezanje ili na samoj površini gdje inicijaciji pukotine pridonose i ostala eventualna oštećenja kao što su ogrebotine, rezovi i tragovi brušenja i druga oštećenja.



Slika 19. Oštećenje umorom površine na zubima zupčanika [5]

Ako se kao rezultat cikličnog djelovanja opterećenja i fizičko-kemijskih utjecaja sredstava za podmazivanje, na dijelovima koji se kotrljaju ili kotrljaju sa proklizavanjem, javlja pojava trošenja površinskog sloja u obliku mjestimičnog gubitka materijal, radi se o trošenju tijekom pitinga. Ovaj oblik trošenja najčešće se javlja kod spregnutih zupčanika koji su u stalnom kontaktu sa uljem.



Slika 20. Oštećenje zubi zupčanika zbog umora površine [6]

Kao rezultat umora materijala površinskog sloja u zoni dodira i pod utjecajem neprekidnog djelovanja promjenjive vrijednosti kontaktnih pritisaka nastaju mikrooštećenja koje se šire u pravcu traga trenja što u krajnjem slučaju dovodi do otkidanja čestica materijala u obliku ljuski.

U slučaju podmazivanja kada je riječ o otkidanju čestica materijal se ubrzava djelovanjem sile privlačenja između čestica graničnih slojeva metalnih površina.

Pojava pitinga posebno je zanimljiva kod zupčastih prijenosnika, gdje se pojavljuje u dva oblika i to:[7]

- **progresivan**
- **prolazan**

U slučaju progresivnog pitinga prvo se pojavljuju udubljenja kao izvori koncentracije napona koji izazivaju nove pukotine i odvajanje čestica materijala.

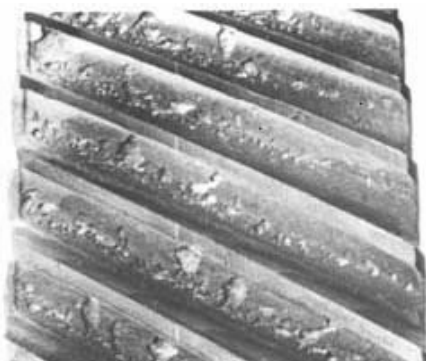
Krajnji slučaj trošenja je potpuno oštećenje površina.

Progresivno rupičenje (piting) uzrokovano je umor materijala i inicijacijom mikropukotina na površini ili ispod nje. Rastom i eventualnim spajanjem pukotina te njihovim izbijanjem na površinu dolazi do odvajanja i otkidanja manjih ili većih komadića materijala nakon čega na tim mjestima ostaju jamice različitih promjera i dubina (slika 21). Kao najčešća mjesta nastanka površinski iniciranog rupičenja navode se mikro neravnine uzrokovane strojnom obradom bokova (glodanje, brušenje), greške i/ili strani uključci u materijalu te toplinskom obradom uzrokovani poremećaji u strukturi materijala.

U slučaju ispod površinski iniciranog pitinga, pukotine pretežno nastaju u području u kojem smično naprezanje uzrokovano kotrljajuće-kliznim opterećenjem dostiže svoje najveće vrijednosti.

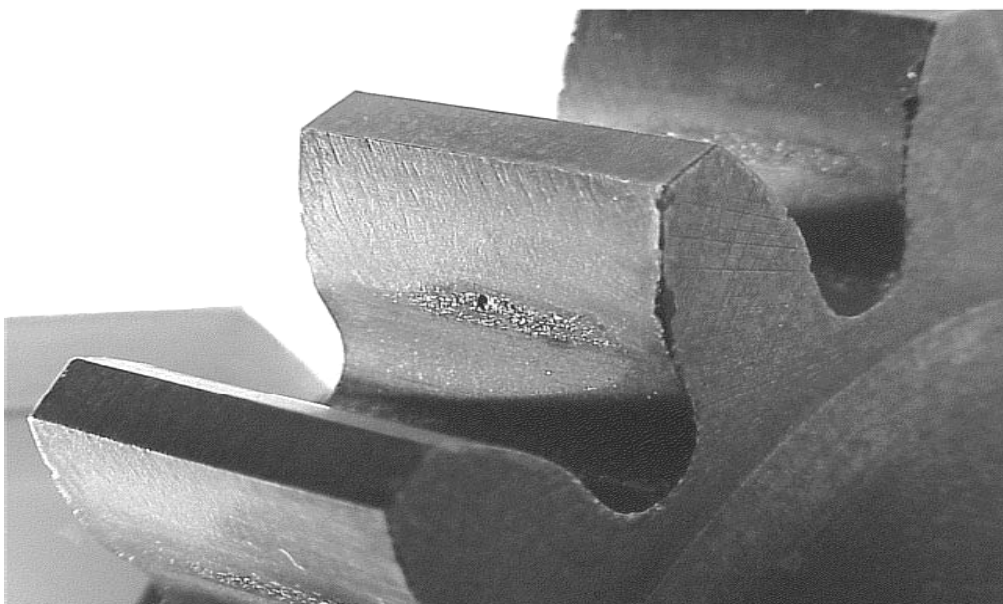
Budući da progresivno rupičenje ne uzrokuju samo lokalne nepravilnosti i hrapavost bokova zuba, ono napreduje i nakon završetka početnog zaglađivanja površina bokova. Kontinuiranim širenjem rupičenja smanjuje se nosiva površina bokova zuba. U izraženijim slučajevima može doći do gubitka izvornog profila zuba, a time i do prekomjernih vibracija te porasta dinamičkih opterećenja koja mogu uzrokovati i konačni lom zuba odnosno oštećenja zupčanika.

Na slici 21 je prikazano progresivno rupičenje na bokovima zuba zupčanika.



Slika 21. Slika prikazuje progresivno rupičenje na bokovima zuba zupčanika [7]

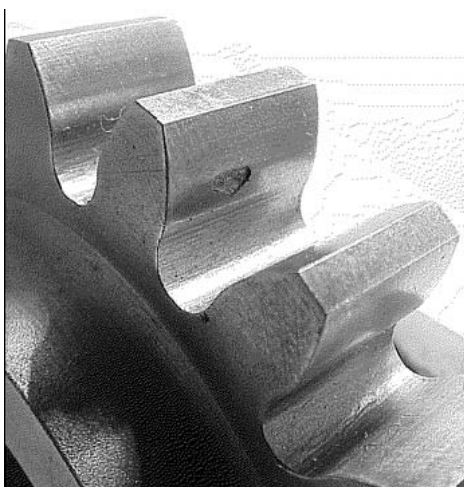
Mikro rupičenje označava pojavu velikog broja plitkih mikro pukotina i rupica dubine do nekoliko mikrona zbog kojih zahvaćeni dijelovi površina boka zuba poprimaju „smrznuti“ ili mat-sivi izgled (slika 22).



Slika 22. Mikro rupičenje na zubima zupčanika [7]

Uslijed izravnog kontakta, vrhovi neravnina se dijelom plastično deformiraju, a dijelom otkidaju, što vrlo brzo dovodi do oštećenja plitkog površinskog sloja materijala zuba i stvaranja spomenutih mikropukotina. Cijeli proces može biti dodatno potpomognut i intenziviran manjkavim uvjetima podmazivanja jer toplina stvorena tijekom zahvata dodatno smanjuje viskoznost ulja i stanjuje uljni film. To može dovesti do njegova probijanja i izraženijeg metalnog kontakta na širem području pa i na cijeloj površini bokova zuba. Iako ovaj oblik oštećenja površine sam po sebi nije izrazito kritičan te u slučaju dobrog podmazivanja može doći do njegova zaustavljanja, postoji mogućnost da u određenim uvjetima daljnje širenje na taj način iniciranih mikropukotina dovede do ozbiljnijeg oštećenja površine.[7]

Engleskim pojmom *flake pitting* (engl. *flake* = pahuljica, tanki list) označava se oštećenje trostranog oblika na širem području boka zuba kako je prikazano na slici 23. Nastaje odvajanjem tankih ljuskica materijala od osnovnog materijala zuba.



Slika 23. Slika prikazuje "flake pitting" oštećenje na zubu zupčanika [7]

Prolazan piting javlja se najčešće u početnoj fazi korištenja novih zupčanika. Javlja se na mjestima koja su zbog lokalnih geometrijskih nepravilnosti i hrapavosti površine boka izložena većim kontaktnim pritiscima i izravnom metalnom kontaktu. Nakon popravka oštećenja na bokovima zubiju, na površine bokova zuba u kontaktu opterećenje se raspodjeljuje (na veću površinu), a naprezanja u površinskom sloju materijala smanjuju se ispod razine kod koje dolazi do oštećivanja, te se piting zaustavlja.

Na proces trošenja pitingom presudan utjecaj imaju:

- geometrija površina
- materijal dijelova u kontaktu
- sredstvo za podmazivanje
- vanjski utjecaji

Parametri kojima se definira geometrija oštećenih površina, a koji utiču na pojavu pitinga su:

- visina neravnina
- točnost obrade
- greške oblika.

Pojava pitinga nastaje uz prisustvo sredstava za podmazivanje. Ljepljivost tečnosti ima pozitivan utjecaj na umornu trajnost.

Materije koje se dodaju mazivu mogu imati pozitivan ili negativan utjecaj na pojavu pitinga.

Tako na primjer dodaci na osnovu fosfora ili molibdena povećavaju otpornost prema pitingu, dok dodaci masnih kiselina i stearinske kiseline povećavaju mogućnost pojave pitinga.

Opterećenje dijelova ipak ima glavni utjecaj na razvoj procesa trošenja.

Trajnost materijala opada sa porastom opterećenja. Brzina kretanja ne utiče direktno na proces stvaranja pukotina.

4.3. Primjeri nepredviđenog kotrljajućeg trošenja materijala

Tipični primjeri tribosustava u kojima je prisutno kotrljajuće gibanje i kotrljajuće trošenje su

- zupčanici
- kotrljajući ležajevi.

Zahvat evolventnih zupčanika putem kojeg dolazi do prijenosa gibanja i snage s jednog zupčanika na drugi, vrlo je složen. [7]

Na značajke i vrijednosti naprezanja i deformacija kojima je materijal bokova zuba zupčanika u radu podvrgnut te na njegovu trajnost izravno utječu geometrija ozubljenja, kinematika zahvata, vrsta i vrijednost opterećenja, značajke materijala i površine bokova, uvjeti podmazivanja te niz drugih veličina, koje sve zajedno definiraju uvjete u kojima se odvija zahvat zupčanika.

Osim navedenog, za korektno i uspješno konstruiranje i dimenzioniranje zupčanika, posebice s obzirom na trajnost, potrebno je dobro poznavati i moguća oštećenja te mehanizme koji dovode do njihovog nastanka.

Iz tog razloga u radu su opisane osnovne značajke kotrljajućeg klznog-kontaktnog umora materijala boka zuba zupčanika te uzroci pojave i značajke s njim povezanih oštećenja materijala. Te pojave mogu poslužiti kao pomoć pri sprečavanju ili naknadnoj identifikaciji i uklanjanju potencijalnih problema kod zupčastih prijenosnika snage.

4.4. Materijali za zupčanike

Kako bi smanjili nepoželjna rupičasta oštećenja i trošenje materijala kod zupčanika potrebno je slijediti opće upute za izbor materijala .

Upute za izbor materijala tipičnog tribosustava s kotrljajućim gibanjem dane su u tablici 4. a orijentacijska svojstva tipičnih materijala na slikama 24 i 25.

Tablica 4. Opće upute za izbor materijala [1]

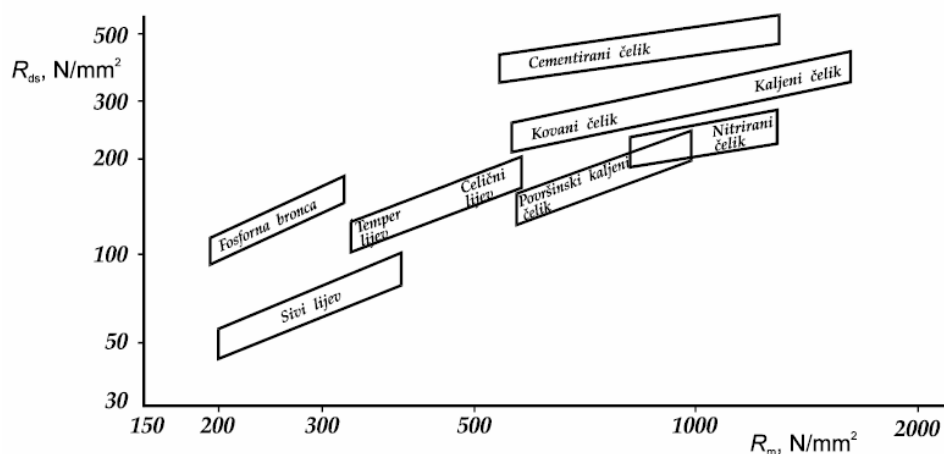
Radni uvjeti	Manji zupčanik		Veći zupčanik
Samo prijenos gibanja(sila ≈ 0)	Nemetali, mjed, meki čelik i nehrđajući čelik u bilo kojoj kombinaciji		
Lakši uvjeti ↓ i	Temper lijev	Nemetali, mjed, fosforna bronca, temper lijev	
	Sivi lijev	Sivi lijev	
	Čelik normaliziran	Sivi lijev, Srednje ugljični niskougljični niskolegirani čelik normaliziran	
	Srednjeugljčni niskolegirani čelik visoke čvrstoće -poboljšan	Srednjeugljčni čelik normaliziran	
	Srednjeugljčni niskolegirani čelik visoke čvrstoće -nitritan	Srednjeugljčni niskolegirani čelik -nitritan	
	Srednjeugljčni niskolegirani čelik indukcijski kaljen	Srednjeugljčni niskolegirani čelik indukcijski kaljen	
Teži uvjeti			

Materijal manjeg zupčanika može biti u paru s bilo kojim materijalom većeg zupčanika koji je u istoj razini kakvoće ili iznad nje.

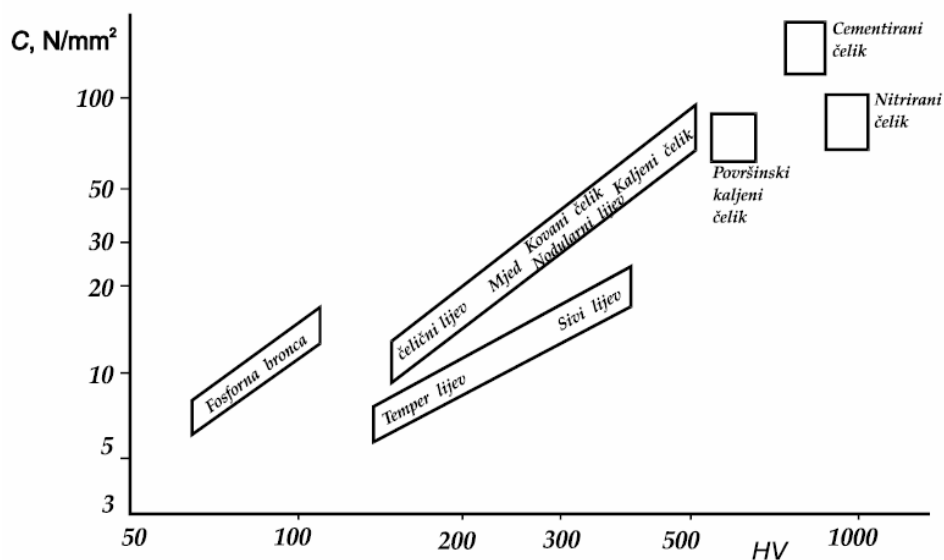
Fosforna bronca ne smije biti u paru s mekim čelikom.

R_{ds} - savojna dinamička izdržljivost N/mm^2

R_m - vlačna čvrstoća N/mm^2



Slika 24. Dijagram savojne dinamičke izdržljivost R_{ds} – vlačne čvrstoće R_m uobičajenih materijala zupčanika [1]



Slika 25. Dijagram C –HV uobičajenih materijala zupčanika, HV-VICKERS-ova tvrdoća HV[1]

4.5. Materijali za kuglične ležajeve

Za kuglične ležajeve koriste se materijali i to iz sljedeće grupe :[1]

- čelici za cementiranje
- visokolegirani nehrđajući čelici
- keramika (silicijev nitrid Si_3N_4)

U većini slučajeva koriste se niskolegirani Cr-čelici:

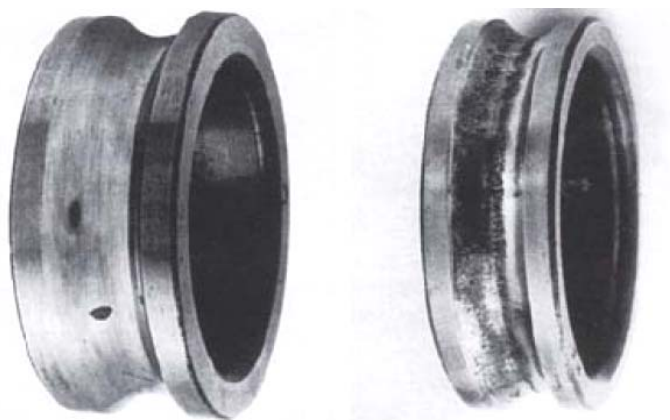
prsteni :100Cr6 (1%C; 1,5% Cr), 115CrV3, 140Cr3

tijela: 105Cr4 (1,05%C; 1% Cr), 100Cr6, 100CrMn6

Svi ti materijali moraju ispuniti sljedeće zahtjeve kao što su:

- a) visoka otpornost na trošenje
- b) visoka dinamička izdržljivost
- c) dobra žilavost
- d) jednolika tvrdoća (bez mekih mjesta)
- e) visoka tvrdoća (do 65 HRC)
- f) jednolika struktura
- g) sitnozrnata struktura
- h) odsustvo segregacija i uključaka (metalnih i nemetalnih)
- i) dobra prokaljivost
- j) stabilnost poslije kaljenja

Na slici 26 prikazana su rupičasta oštećenja na kliznoj stazi prstena kotrljajućeg ležaja.



Slika 26. Rupice u kliznoj stazi unutrašnjeg prstena kotrljajućeg kugličnog ležaja [1]

5. PODMAZIVANJE

Tribološki procesi na opterećenim površinama strojnih elemenata u relativnom kretanju mogu se značajnije izmijeniti podmazivanjem.

Bez podmazivanja većina strojnih elemenata radila bi samo kratko vrijeme.

Podmazivanje je postupak kojim se smanjuje trenje i trošenje materijala primjenom različitih vrsta maziva.

Svrha podmazivanja je da se površine u dodiru razdvoje slojem maziva koje se može smicati s manjim otporom bez izazivanja oštećenja površina. Povećano trošenje koje već nakon razmjerno kratkog vremena nastupa uslijed neodgovarajućeg podmazivanja onemogućava dulji rad stroja koji mora biti zaustavljen i popravljen.

Troškovi popravka stroja kroz utrošak materijala, dijelove i potreban rad mogu biti veliki, ali gubici nastali prekidom proizvodnje, pa čak i utjecajem na ostale dijelove proizvodnog lanca, vrlo često su višestruko veći.

Uz neodgovarajuće podmazivanje, i prije nego što dođe do istrošenja pojedinih dijelova stroja, sile trenja između kliznih površina mogu biti tako velike da dolazi do prevelikih gubitaka energije, pretjeranog zagrijavanja dijelova opterećenja pogonskih motora.

Konačno, uslijed neodgovarajućeg podmazivanja rad strojeva postaje neravnomjeran i bučan. Sa stanovišta podmazivanja teži se punim tekućim mazivim slojevima koji osiguravaju potpuno odjeljivanje opterećenih površina.

Na ovaj način trenje je najmanje i svodi se samo na svladavanje smičnih naprezanja u sloju tekućeg maziva.

Adhezijskih trošenja značajnijih nema jer ne dolazi do direktnog međusobnog kontakta opterećenih površina.

Osnovna tri režima podmazivanja su:[1]

- podmazivanje graničnim slojem maziva
- podmazivanje mješovitim slojem maziva
- podmazivanje potpunim slojem maziva

Kako se u ovom diplomskom radu opisuje smanjenje umora površine izborom odgovarajućeg ulja, u sljedećem poglavlju biti će ukratko opisana ulja za zupčanike.

5.1. Ulja za zupčanike

Podmazivanje zupčastih prijenosnika uključuje hidrodinamičko, elastohidrodinamičko i mješovito podmazivanje.

Pri tom se teži punom elastohidrodinamičkom mazivom sloju čija je debljina barem tri puta veća od srednje površinske hrapavosti bokova zuba.

Ulja za prijenosnike i tehnologija podmazivanja u prijenosnicima trebaju ispuniti sljedeće osnovne funkcije a to su:

- odvođenje topline nastale trenjem od kliznih kontakata
- prijenos snage i smanjenje trenja
- sprečavanje ili smanjenje mehaničkih trošenja i oštećenja

Ulja pored toga moraju ispuniti sljedeće sekundarne funkcije:

- sprečavanje korozije ležaja i zupčanika
- sprečavanje prodiranja onečišćenja.

Ukoliko se mazivo za zupčanike promatra kao konstrukcijski element, treba ispuniti sljedeće dodatne funkcije:

- stvoriti mazivi sloj za prenošenje opterećenja između kliznih površina kod postojećih brzina i radnih temperature
- odvesti nastalu toplinu
- ukloniti čestice nastale trošenjem.

Zupčasti prijenosnici mogu imati čeone, stožaste, pužne ili hipoidne zupčaničke parove ili njihove kombinacije u različitim konstrukcijskim izvedbama. Prilikom odabiranja ulja za zupčaste prijenosnike potrebno je razmotriti sljedeće faktore konstrukcije i uvjeta rada:

1. Vrsta zupčanika (omjer prijenosa)
2. Radna temperatura(prijenosna snaga)
3. Priroda opterećenja
4. Vrsta pogona(motor, turbina, ili klipni parni stroj)
5. Onečišćenje vodom

Ulja za zupčanike možemo podijeliti na dvije glavne skupine

- Ulja za zupčaste prijenosnike automobila
- Ulja za zupčaste prijenosnike u industriji

5.1.1. Ulja za zupčaste prijenosnike automobila

Proizvođači vozila glavni su pokretači razvitka ulja za prijenosnike u vozilima.

Glavni ciljevi ocjenjuju se ekonomičnošću potrošnje goriva, produljenjem intervala zamjene ulja, produljenjem radnog vijeka opreme te smanjenjem troškova održavanja.

Zahtijeva se rad u širokom temperaturnom intervalu za što valja poboljšati reološka svojstva maziva. Ulja za zupčanike mogu biti jednogradacijska i višegradacijska, mineralne osnove, polusintetička ili sintetička.

5.1.2. Ulja za zupčaste prijenosnike u industriji

Napredak u metalurgiji i proizvodnji zupčanika omogućio je izradu preciznih kompaktnih prijenosnih jedinica, a posljedica toga su visoka i često udarna opterećenja bokova zubi. Kod njihovog podmazivanja, u ulju se povećava radna temperatura, koja uzrokuje povećanu oksidaciju čiji je rezultat povećana viskoznost ulja i stvaranje taloga, dok su prijašnje temperature bile uglavnom između 50 -70 °C, danas su znatno više do 100 °C. Ova ulja moraju raditi u dosta različitim uvjetima, za razliku od ulja za automobilske prijenosnike. Moraju zadovoljiti kod podmazivanja zupčanika u kontaktu čelik-čelik kao i čelik-bronca (pužni prijenosi). Osim toga od ovih ulja se zahtijeva brzo odjeljivanje vode i zadovoljavajuća otpornost aditiva na utjecaj vode. Zupčasti prijenosnici u industriji rade u području hidrodinamičkog i mješovitog trenja. Razvoj maziva za industrijske prijenosnike je konstantan, prvenstveno ovisan o zahtjevima za visokim radnim svojstvima, tako da najnovije smjernice već prelaze svojstva svih poznatih standarda koja opisuju ulja za industrijske prijenosnike. Pažljivi odabir baznog ulja i aditivne tehnologije mogu zadovoljiti i najstrože zahtjeve ulja za zupčanike. Za najširu primjenu i dalje ostaju formulacije na osnovi mineralnog ulja uz dodatak aditiva.

6. KOTRLJAJUĆE ISPITIVANJE METODOM “4 KUGLICE” (“FOUR BALL”IP 300)

Uređaj "četiri kuglice" isprva je razvijen za ispitivanje karakteristika maziva prema standardu IP 300.[8]

Danas uređaj služi i za eksperimentalno određivanje dinamičke izdržljivosti površine materijala, svojstva koji je glavni pokazatelj otpornosti na kotrljajuće trošenje. Uređaj za ispitivanje ovom metodom nalazi se u Laboratoriju za tribologiju, Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

6.1. Opis uređaja “4 kuglice” T - 03

Kod ovog ispitivanja tri donje kuglice su u kotrljajućem dodiru dok se na njih određenom silom oslanja gornja kuglica koja rotira u držaču. Mjeri se vrijeme koje je potrebno da dođe do pojave tzv. pitinga odnosno oštećenja u obliku rupice na gornjoj kuglici.



Slika 27. T - 03 Uređaj za ispitivanje metodom “4 kuglice” (“FOUR BALL”)

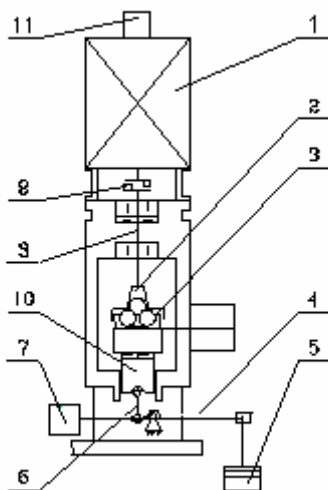
6.2. Dijelovi uređaja T – 03

Uređaj T-03 sastoji se od mikroprocesora i mehaničke jedinice koja služi za kontrolu i mjerenje rezultata.

Kinematička shema uređaja prikazana je na sljedećoj slici.

Dijelovi uređaja : [8]

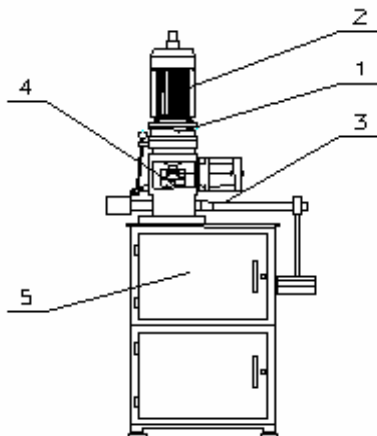
1- asinkroni motor, 2 - držač gornje kuglice, 3 - sklop posude u kojoj su kuglice, 4 - poluga utega, 5 - pomični uteg, 6 - klin za podešavanje opterećenja, 7 - nepomični uteg, 8 - nosač držača gornje kuglice, 9 - spojka, 10 - gurač, 11 - senzor za očitavanje brzine rotacije.



Slika 28. Kinematička shema uređaja T - 03 [8]

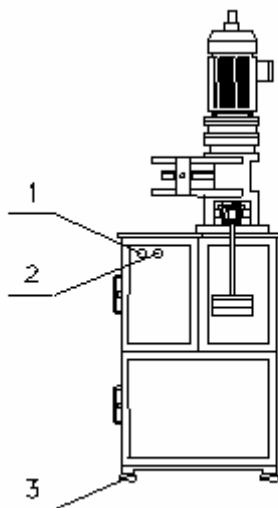
Mehanički dijelovi uređaja prikazani su na slijedećim slikama:[8]

- 1 - tijelo uređaja, 2 - pogonska jedinica, 3 - segment za podešavanje opterećenja
4 - sklop dijelova u kojima rotiraju kuglice 5 - postolje



Slika 29. Prednji pogled uređaja T - 03 [8]

- 1 - gumb za uključivanje motora 2 - gumb za isključivanje motora
3 - podnožje uređaja



Slika 30. Bočni pogled uređaja T - 03 [8]

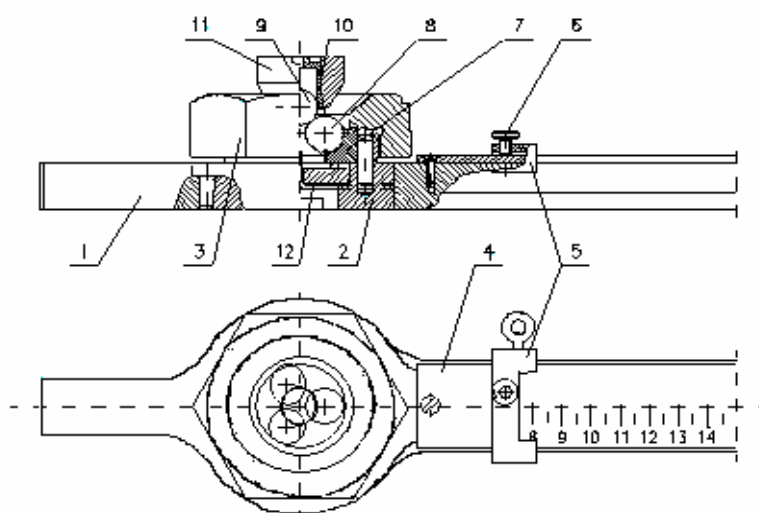
6.2.1. Tijelo uređaja

Funkcionalne jedinice, senzori i dodatni instrumenti ugrađeni su u tijelo uređaja. U sredini uređaja se nalazi segment za podešavanje opterećenja. Pogonska jedinica je smještena na gornjoj strani tijela uređaja. Držač gornje kuglice je postavljen u glavni nosač, i rotira se pomoću pogonske jedinice. Tijelo uređaja je napravljeno od lijevanog željeza.

6.2.2. Dodir kuglica

Dijelovi uređaja u kojem rotiraju kuglice : [8]

1- željezni okvir posude, 2- posuda u kojoj su kuglice, 3- matica, 4 - traka s mjerilom, 5 - klizni uložak, 6 - podešavajući vijak, 7 - posuda za donje kuglice, 8 - donje kuglice, 9 - gornja kuglica, 10 - držač gornje kuglice, 11- nosač držača gornje kuglice, 12 - senzor za mjerenje temperature



Slika 31. Prikaz sklopa dijelova u kojem rotiraju kuglice [8]

6.3. Tehnički podatci o uređaju T - 03



Slika 32. Specifikacijska pločica na uređaju

Tablica 5. Tehnički podatci o uređaju T - 03 [8]

Dimenzije uređaja	620 x 1100 x 1700 mm
Masa uređaja	≈ 165 kg
Snaga asinkronog motora	1.5.kW
Napon, frekvencija	230V,50 Hz

Sustav podmazivanja : uranjanje u mazivo koje se testira

Primijenjeno opterećenje : konstantno je tijekom jednog ispitivanja, a moguće ga je mijenjati u intervalu od 0 do 7848 N

Vrsta dodira : točkasti dodir, formiran dodirom površina četiri kuglice promjera 12,7mm - tri donje kuglice slobodno rotiraju u posebnoj posudi

Vrsta trošenja : - kotrljajuće trošenje; konstantna brzina rotacije u intervalu od 50 do 1500 okretaja u minuti (odnosi se na rotaciju gornje kuglice)

6.3.1. Pogonska jedinica

Pogonska jedinica uređaja sastoji se od asinkronog motora, spojke, nosača i držača gornje kuglice.

Snaga asinkronog motora je 1.5 kW, a broj okretaja motora je 1500 okr/min.

Asinkroni motor preko spojke okreće nosač, koji rotira držač kuglice a samim time i gornju kuglicu.



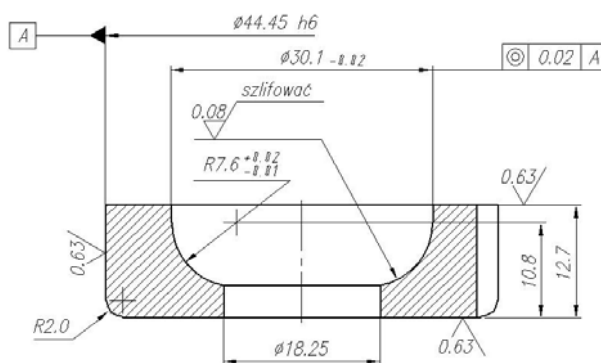
Slika 33. Asinkroni motor na uređaju T – 03

7. PRIPREMA UZORAKA

Posuda u kojoj se rotiraju donje kuglice mora zadovoljavati neke zahtjeve i to:

- Hrapavost površine po kojoj kuglice rotiraju iznosi $0.08 \mu\text{m}$ ($R_a = 0.08 \mu\text{m}$)
- Posuda je napravljena od alatnog čelika i toplinski obrađena tako da joj tvrdoća bude $62 \pm 2 \text{ HRC}$.

Za ispitivanje potrebno je koristiti jednu posudu za sva 24 ispitivanja ukoliko je to moguće, no koliko će se posuda koristiti ovisit će prvenstveno o općem stanju površine koja treba biti bez oštećenja, ogrebotina, rupica i slično.



Slika 34. Tehnički crtež posude u kojoj se nalaze tri donje kuglice [8]

Za ispitne uzorke korištene su čelične kuglice promjera 12.7 mm. Ukupni broj ispitnih kuglica mora biti dovoljan za 24 ispitivanja. Da bi ispitivanje bilo uspješno provedeno mora pri svakom ispitivanju doći do pitinga bar na jednoj od kuglica.



Slika 35. Kuglice za ispitivanje

7.1. Postavljanje tri donje kuglice u odgovarajući položaj

Tijekom ispitivanja pomoću ovog uređaja mjeri se :

- razina vibracija tribosistema
- temperatura lubrikanta
- vrijeme trajanja ispitivanja

Izmjerene vrijednosti prikazuju se na ekranu monitora i spremaju se u memoriju računala koje je povezano s uređajem. Nakon što razina vibracija dosegne kritične vrijednosti koje uzrokuju piting na jednoj od kuglica, motor uređaja T - 03 se automatski zaustavlja. Dobiveni rezultati mogu se prikazati dijagramom na kojem su vidljiva stanja temperature lubrikanata, vibracije tribosustava, kao i vrijeme trajanja ispitivanja.

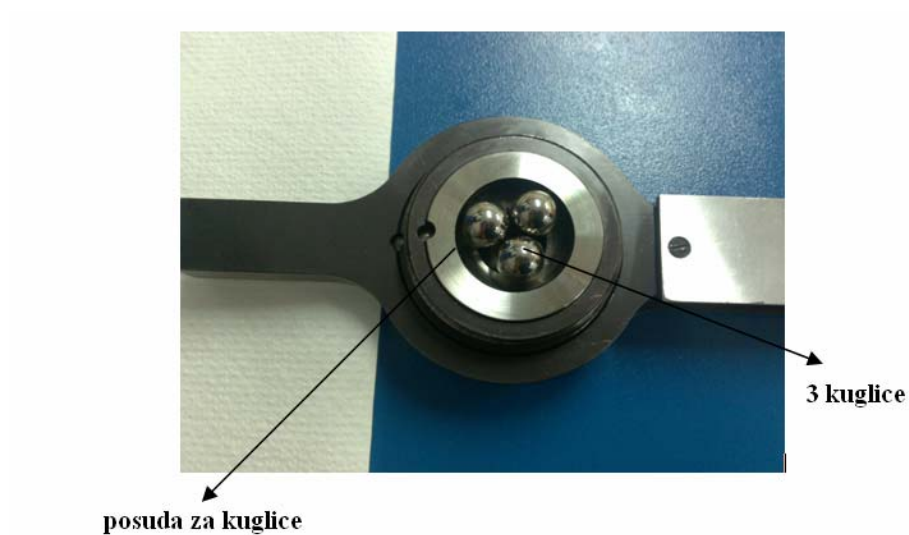
Da bi smo pravilno postavili tri donje kuglice potrebno je napraviti slijedeće korake :

1) zaključati polugu utega povlačenjem ručke prema dolje



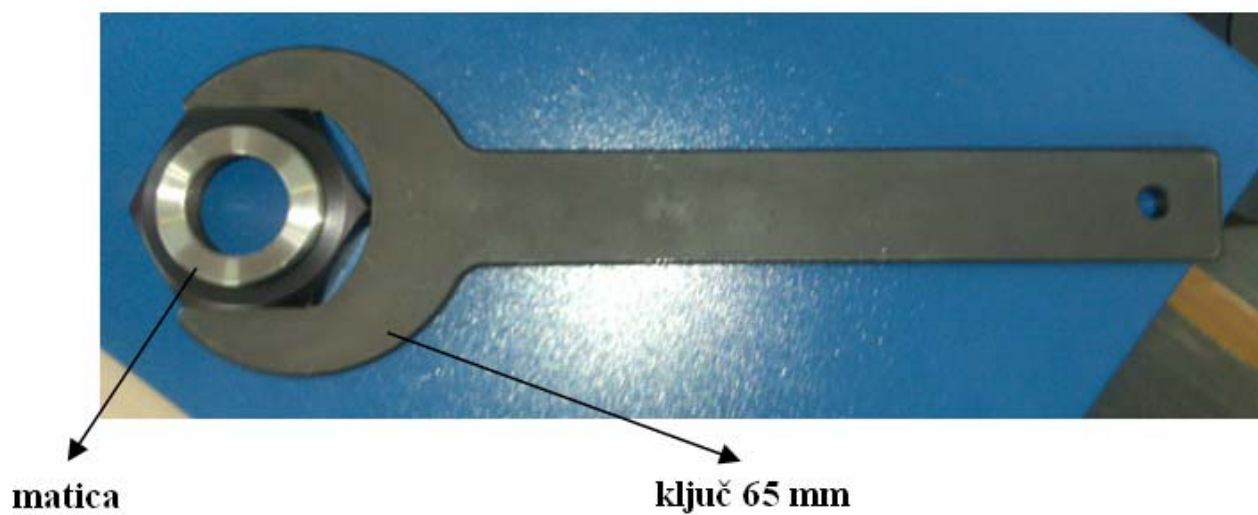
Slika 36. Prikaz ručke za zaključavanje poluge

2) postaviti tri kuglice u posudu za mjerenje



Slika 37. Posuda sa kuglicama

3) stegnuti maticu pomoću ključa 65 mm dobivenim uz uređaj



Slika 38. Prikaz ključa 65 mm i matice

4) nadoliti ulje u posudu u kojoj se nalaze 3 kuglice tako da ulje pokrije površinu kuglica



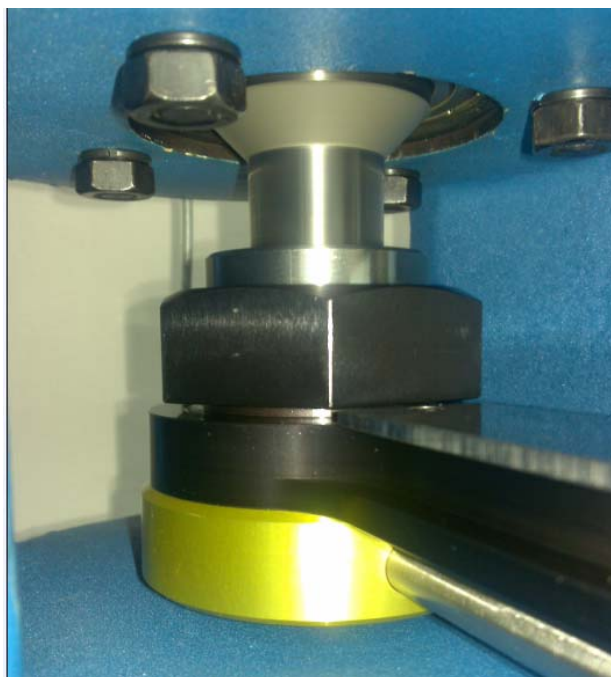
Slika 39. Prikazuje ulja korištenog u radu za mjerenja

5) staviti četvrtu kuglicu u gornji položaj stroja



Slika 40. Prikazuje kuglicu u gornjem položaju stroja

6) sklop u kojem se rotiraju kuglice postaviti na postolje stroja



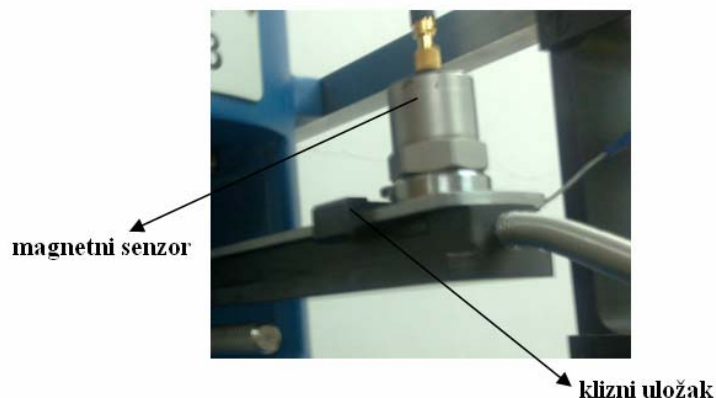
Slika 41. prikazuje sklop u kojem se rotiraju kuglice postavljenim na postolje stroja

7) postaviti ručku poluge utega u gornji položaj



Slika 42. prikaz ručke u gornjem položaju

- 8) provjeriti da li se donje kuglice mogu slobodno rotirati u posudi kao i gornji nosač u kojem se nalazi kuglica
- 9) staviti klizni uložak
- 10) staviti magnetni senzor



Slika 43. prikazuje magnetni senzor i klizni uložak na željezni okvir posude

- 11) uključiti stroj
- 12) postaviti utege prema redoslijedu prvo 100 kg, zatim 600 kg



Slika 44. Slika prikazuje utege stroja

- 13) nakon završetka ispitivanja ugasi stroj i obrnutim redoslijedom demontirati dijelove
- 14) dijelove koji su bili neposredno u doticaju sa uljem potrebno oprati i osušiti ih kako bi se mogla vršiti druga mjerenja

8. REZULTATI MJERENJA

U ovom su poglavlju prikazani rezultati ispitivanja trošenja 4 vrste ulja za zupčanike koja su označena sa A, B, C i D. Za svako ulje su napravljena po 3 mjerenje i prilikom svakog mjerenja su korištene iste kuglice.

Tri kvantitativne veličine koje se dobivaju ovom metodom, a koriste se za analizu rezultata su:

- razina vibracija tribosustava (minimalno 0 - maksimalno 1)*,
- temperatura ulja u tribosustavu (°C)
- vrijeme trajanja ispitivanja (sek.)

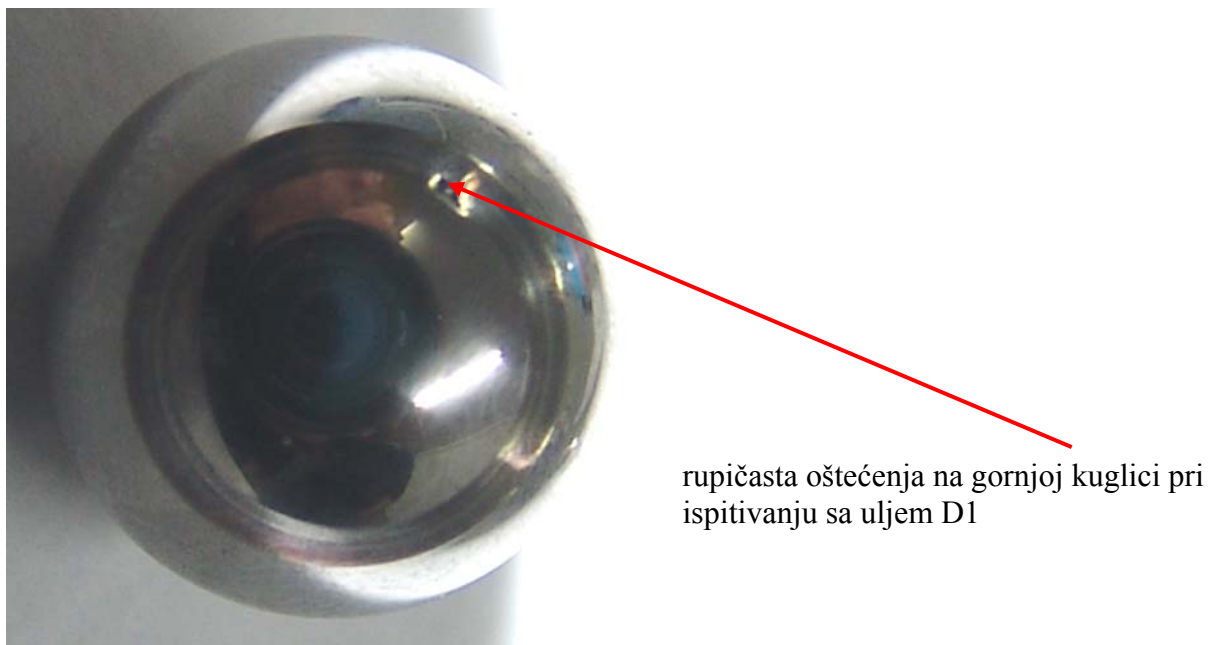
* Razinu vibracija određuju mehanička oštećenja kuglica za ispitivanje. Neke od oštećenih kuglica prikazane su na slikama 45 do 47.

Na slici broj 45 prikazano je rupičasto oštećenje kuglice pri mjerenju sa uljem A1. Iz slike je vidljivo najveće rupičasto oštećenje ako se usporedi sa ostalim ispitanim kuglica a što dokazuje i sam grafički prikaz vibracija na slici 53.



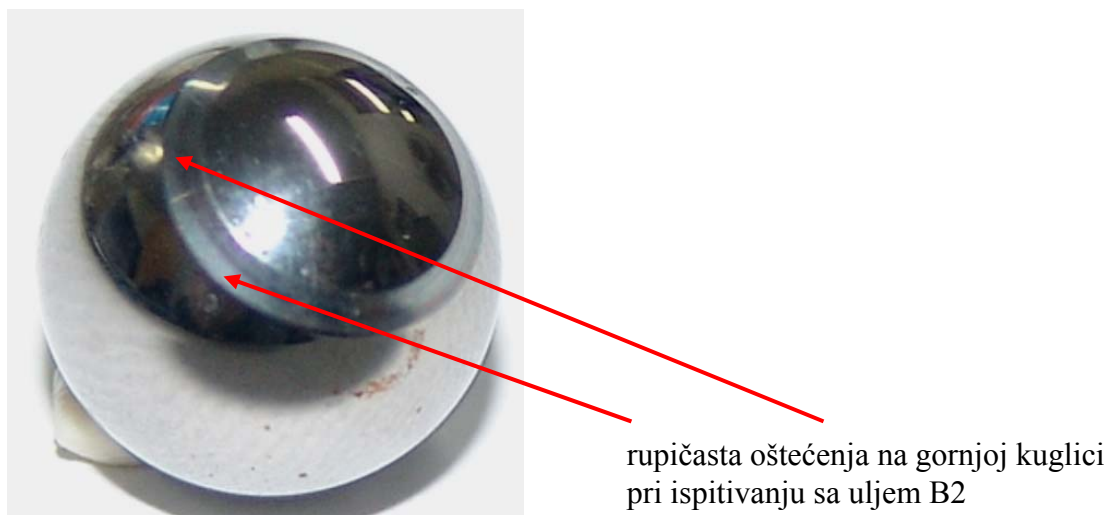
Slika 45. Slika prikazuje rupičasto oštećenje površine kuglice pri mjerenju sa uljem A1

Na slici 46 prikazano je rupičasto oštećenje kuglice pri mjerenju sa uljem D1. Iz ove slike vidljivo je nešto manje oštećenje u obliku pitinga na gornjoj kuglici u odnosu na sliku kuglice 45 . Grafički prikaz slika 53 vibracija na grafu to i potvrđuju.



Slika 46. Slika prikazuje rupičasto oštećenje površine kuglice pri mjerenju sa uljem D1

Na slici 47 prikazano je najmanje rupičasto oštećenje kuglice pri mjerenju sa uljem B2. Iz grafičkog prikaz na slici 53 vidljivo je da su vibracije ispitanog ulja najmanje.



Slika 47. Slika prikazuje rupičasto oštećenje površine kuglice pri mjerenju sa uljem B2

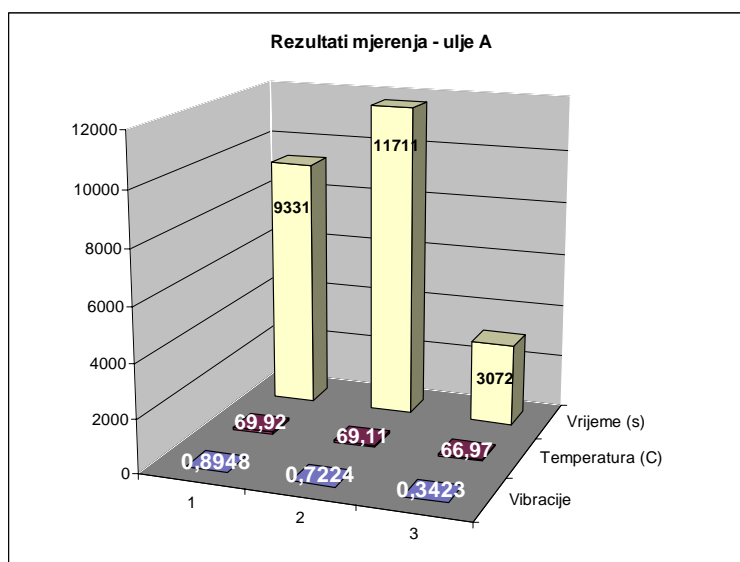
Ulje A

Rezultati ispitivanja u kojem je korišteno ulje A su prikazani u tablici 6.

Tablica 6. Rezultati ispitivanja ulja A

Oznaka uzorka	Temperatura (°C)	Vrijeme trajanja ispitivanja (sek.)	Razina vibracija
A1	69,92	9331	0,8948
A2	69,11	11711	0,7224
A3	66,97	3072	0,3423

Rezultati ispitivanja ulja A u grafičkom obliku su prikazani na slici 45.



Slika 48. Grafički prikaz rezultata ispitivanja ulja A

Iz prikazanih rezultata se vidi kako je temperatura ulja A prilikom sva 3 mjerenja prilično ujednačena i kreće se u rasponu od 66,97°C do 69,92°C što znači da se radi o razlici od 4,40%. Situacija je nešto drugačija kada se gleda vrijeme trajanja ispitivanja koje u slučaju uzorka A3 iznosi 3072 sekunde, a u slučaju uzorka A2 11711 sekundi. U ovom slučaju se radi o razlici od 281,22%. Slična je situacija i kod razine vibracija koje se kreću od 0,3423 (uzorak A3) pa sve do 0,8948 (uzorak A1) što odgovara povećanju od 161,41%. Pri tome treba napomenuti kako nije moguće postaviti korelaciju između vremena trajanja ispitivanja i razine vibracija.

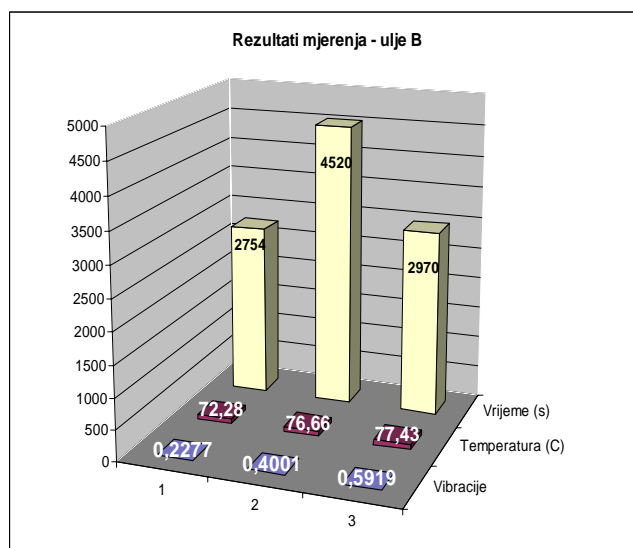
Ulje B

Rezultati ispitivanja u kojem je korišteno ulje B su prikazani u tablici 7.

Tablica 7. Rezultati ispitivanja ulja B

Oznaka uzorka	Temperatura (°C)	Vrijeme trajanja ispitivanja (sek.)	Razina vibracija
B1	72,28	2754	0,2277
B2	76,66	4520	0,4001
B3	77,43	2970	0,5919

Rezultati ispitivanja ulja B u grafičkom obliku su prikazani na slici 46.



Slika 49. Grafički prikaz rezultata ispitivanja ulja B

Iz prikazanih rezultata se vidi kako je temperatura ulja B prilikom sva 3 mjerenja prilično ujednačena i kreće se u rasponu od 72,28 do 77,43°C što znači da se radi o razlici od 7,13%. Situacija je nešto drugačija kada se gleda vrijeme trajanja ispitivanja koje u slučaju uzorka B1 iznosi 2754 sekunde, a u slučaju uzorka B2 4520 sekundi. U ovom slučaju se radi o razlici od 64,12%. Dosta drugačija je situacija kod razine vibracija koje se kreću od 0,2277 (uzorak B1) pa sve do 0,5919 (uzorak B3) što odgovara povećanju od 159,95%. Pri tome treba napomenuti kako nije moguće postaviti korelaciju između vremena trajanja ispitivanja i razine vibracija.

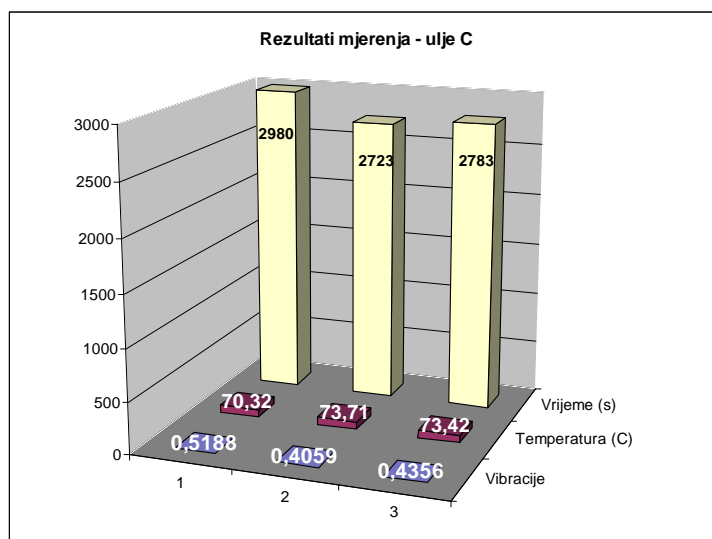
Ulje C

Rezultati ispitivanja u kojem je korišteno ulje C su prikazani u tablici 8.

Tablica 8. Rezultati ispitivanja ulja C

Oznaka uzorka	Temperatura (°C)	Vrijeme trajanja ispitivanja (sek.)	Razina vibracija
C1	70,32	2980	0,5188
C2	73,71	2723	0,4059
C3	73,42	2783	0,4356

Rezultati ispitivanja ulja C u grafičkom obliku su prikazani na slici 47



Slika 50. Grafički prikaz rezultata ispitivanja ulja C

Iz prikazanih rezultata se vidi kako je temperatura ulja C prilikom sva 3 mjerenja prilično ujednačena i kreće se u rasponu od 70,32 do 73,71°C što znači da se radi o razlici od 4,82%. Situacija je slična kada se gleda vrijeme trajanja ispitivanja koje u slučaju (uzorka C2) iznosi 2723 sekunde, a u slučaju (uzorka C1) 2980 sekundi. U ovom slučaju se radi o razlici od 9,44%. Nešto drugačija je situacija kod razine vibracija koje se kreću od 0,4059 (uzorak C2) pa sve do 0,5188 (uzorak C1) što odgovara povećanju od 27,81%. Pri tome treba napomenuti kako nije moguće postaviti korelaciju između vremena trajanja ispitivanja i razine vibracija.

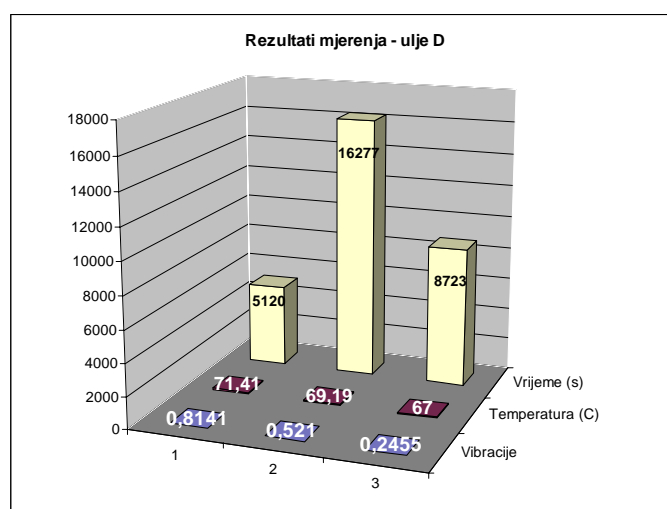
Ulje D

Rezultati ispitivanja u kojem je korišteno ulje D su prikazani u tablici 9.

Tablica 9. Rezultati ispitivanja ulja D

Oznaka uzorka	Temperatura (°C)	Vrijeme trajanja ispitivanja (sek.)	Razina vibracija
D1	71,41	5120	0,8141
D2	69,19	16277	0,521
D3	67	8723	0,2455

Rezultati ispitivanja ulja D u grafičkom obliku su prikazani na slici 48



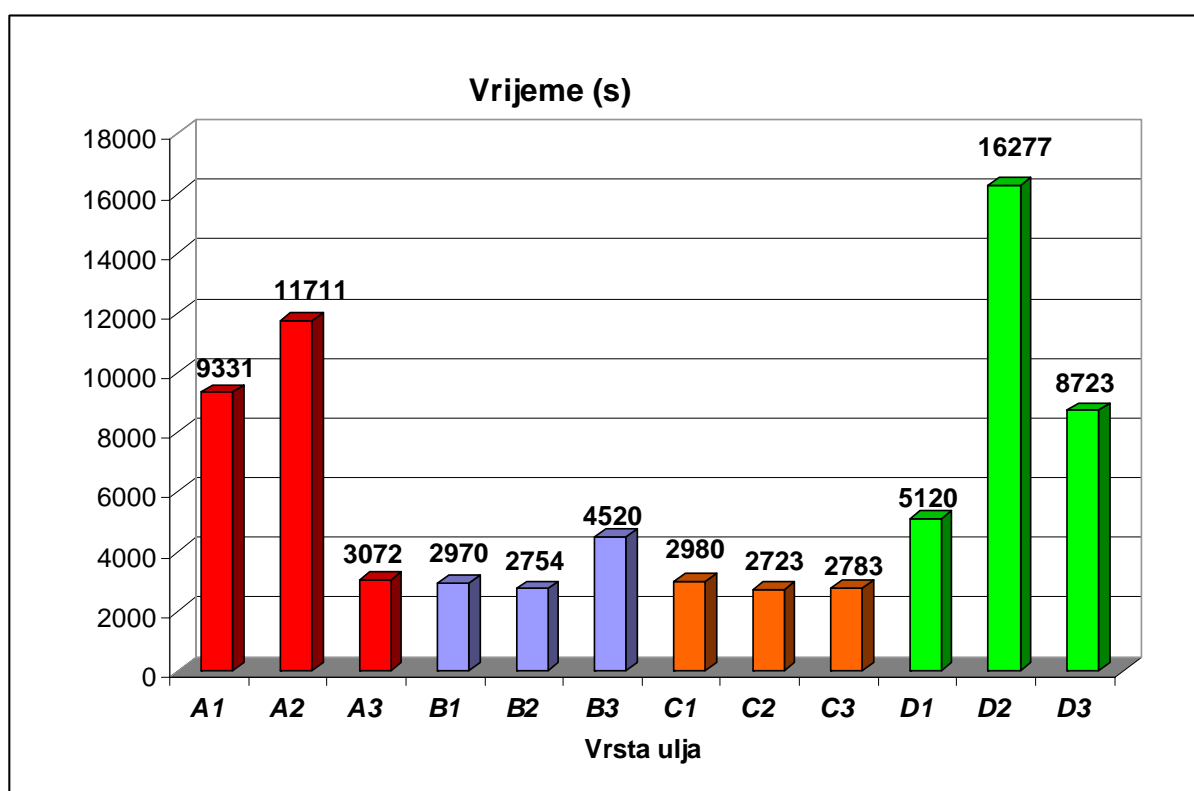
Slika 51. Grafički prikaz rezultata ispitivanja ulja D

Iz prikazanih rezultata se vidi kako je temperatura ulja D prilikom sva 3 mjerenja prilično ujednačena i kreće se u rasponu od 67°C do 71,41°C što znači da se radi o razlici od 6,58%. Situacija je nešto drugačija kada se gleda vrijeme trajanja ispitivanja koje u slučaju (uzorka D1) iznosi 5120 sekunde, a u slučaju (uzorka D2) 16277 sekundi. U ovom slučaju se radi o razlici od 217,91%. Slična je situacija i kod razine vibracija koje se kreću od 0,2455 (uzorak D3) pa sve do 0,8141 (uzorak D1) što odgovara povećanju od 231,61%. Pri tome treba napomenuti kako nije moguće postaviti korelaciju između vremena trajanja ispitivanja i razine vibracija.

9. USPOREDNA ANALIZA

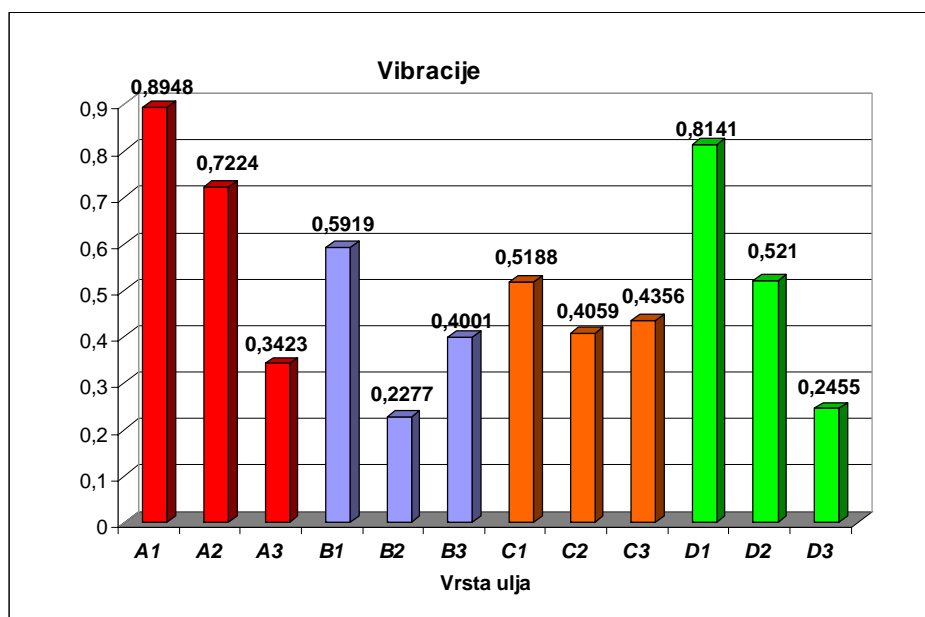
U ovom poglavlju će biti prikazana usporedna analiza rezultata mjerenja ulja A, B, C i D.

Slika 52 prikazuje vrijeme trajanja ispitivanja svih uzoraka koji su grupirani po vrsti ulja.



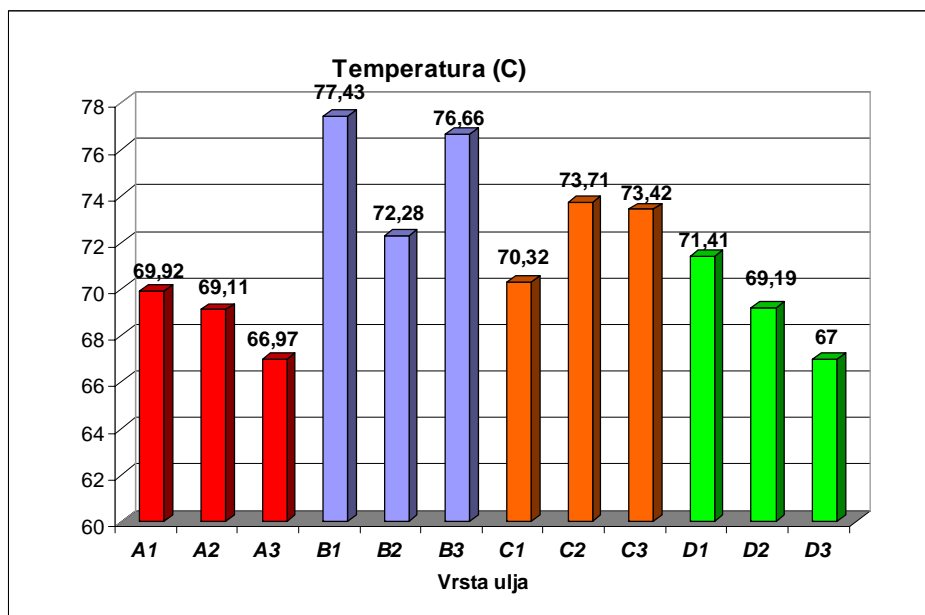
Slika 52. Grafički prikaz vremena trajanja ispitivanja za sve uzorke

Slika 53 prikazuje vibracije pri ispitivanju svih uzoraka koji su grupirani po vrsti ulja.



Slika 53. Grafički prikaz vibracija pri ispitivanju za sve uzorke ulja

Slika 54 prikazuje temperaturu pri ispitivanju svih uzoraka koji su grupirani po vrsti ulja.



Slika 54. Grafički prikaz temperature pri ispitivanju za sve uzorke ulja

10. ZAKLJUČAK

Piting je dominantan mehanizam trošenja kod kotrljanja, a da bi se on smanjio potreban je uz izbor materijala koji ima zadovoljavajuću dinamičku izdržljivost površine i izbor odgovarajućeg ulja. U radu je prikazana mogućnost izbora najboljeg ulja uz pomoć jedne od metoda eksperimentalnog određivanja dinamičke izdržljivosti površine, metode "4 kuglice". Kod ovog ispitivanja tri donje kuglice su u kotrljajućem dodiru dok se na njih određenom silom oslanja gornja kuglica koja rotira u držaču. Mjeri se vrijeme koje je potrebno da dođe do pojave pitinga odnosno oštećenja u obliku rupica na gornjoj kuglici.

U prethodnom poglavlju prikazani su rezultati ispitivanja koji su provedeni u sklopu ovog diplomskog rada. Izvršena su mjerenja sa četiri različite vrste ulja za zupčanike sa kuglicama od istog materijala i istih dimenzija.

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti slijedeće:

- Razina temperature kod svih uzoraka je prilično ujednačena i kreće se u rasponu od 66,97°C (uzorak A3) do 77,43°C (uzorak B1) (razlika 15,62%). Na tom rasponu dolazi do pittinga (oštećenja površina na kuglicama).Prilikom ispitivanja svih uzoraka nisu zabilježene anomalije u kretanju temperature.
- Kod ispitivanja vibracija, uočene su veće razlike između razina vibracija koje se kreću u rasponu 0,2455 (uzorak D3) do 0,8948 (uzorak A1), povećanje 264,48%.
- Vrijeme trajanja ispitivanja je različito , iz prikaza se vidi kako je najduže vrijeme ispitivanja bilo kod uzoraka D2 "16277" sekundi, a zatim kod uzorka A2 "11711"sekundi što upućuje na zaključak kako su ta ulja najprikladnija za primjenu podmazivanja zupčanika. Također se može zaključiti kako ulja A i D imaju bolju karakteristiku od ulja B i C.
- teško je naći vezu između vremena i vibracija...
- pod ovim uvjetima ispitivanja najbolji izbor bilo bi ulje D

Na osnovu provedenih ispitivanja može se zaključiti da bi ulje D pružilo najbolju zaštitu od umora površine od ispitivanih ulja pod ovim uvjetima ispitivanja. S obzirom na veliko rasipanje rezultata za pouzdaniju i točniju odluku bilo bi potrebno napraviti više mjerenja.

PRILOZI

I. Izvještaji o ispitivanju ulja na uređaju T-03 metodom " 4 kuglice"

II. CD-R disc

LITERATURA

- [1] Grilec Krešimir, Ivušić Vinko: "Tribologija", Autorizirana predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za materijale, Zagreb, 2011.
- [2] http://www.fer.unizg.hr/_download/repository/UEMP_pred_19.pdf
- [3] http://www.vorax.hr/dokumenti/hr/vrst_tros_hr.html
- [4] <http://www.rgf.bg.ac.rs/predmet/RO/.../5.TehDi.pdf>
- [5] <http://www.gearsolutions.com/.../NASA0607.pdf>
- [6] <http://forums.pelicanparts.com/porsche-911-technical-forum/324223-pitting-ring-piniun-gears.html>
- [7] <http://hrcak.srce.hr/file/95446> -autori (R. Basan, M. Franulović, B. Križan: Oštećenja bokova zuba zupčanika)
- [8] "T – 03 four ball pitting tester – Operating Manual", Institute for Sustainable Technologies, Department of Tribology, Radom, Poland, 2010.
- [9] Michalczewski Remigiusz, Piekoszewski Witold, Tuszynski Waldemar: "An effect of degradation of automotive gear oils on rolling contact fatigue", National Research Institute, Institute for Terotechnology, Tribology Department, Radom, Poland S.a.
- [10] Waldemar Tuszynski and Witol Piekoszewski, "Effect of type and concentration of lubricating additives on the antiwear and extreme pressure properties and rolling fatigue life of a four -ball tribosystem", Wiley Interscience 2006;18;309-328
- [11] Michalczewski Remigiusz, Piekoszewski Witold: "The method for assessment of rolling contact fatigue of PVD/CVD coated elements in lubricated contacts", Institute for Sustainable Technologies, National Research Institute, Radom, Poland, S.a.